



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FITOTECNIA**

**APLICAÇÃO FOLIAR E RADICULAR DE SILÍCIO COMO ESTRATÉGIA  
PARA A MITIGAÇÃO DO ESTRESSE SALINO EM PLANTAS DE RÚCULA**  
*(Eruca sativa Mill.)*

**LAÉLCIO NOVATO RIBEIRO FILHO**

**VITÓRIA DA CONQUISTA**  
**BAHIA – BRASIL**  
**2026**

**LAÉLCIO NOVATO RIBEIRO FILHO**

**APLICAÇÃO FOLIAR E RADICULAR DE SILÍCIO COMO ESTRATÉGIA  
PARA A MITIGAÇÃO DO ESTRESSE SALINO EM PLANTAS DE RÚCULA  
(*Eruca sativa* Mill.)**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Fitotecnia, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Araquém Ramos Cairo

**VITÓRIA DA CONQUISTA  
BAHIA – BRASIL  
2026**

R369a

Ribeiro Filho, Laércio Novato.

Aplicação foliar e radicular de silício como estratégia para a mitigação do estresse salino em plantas de rúcula (*Eruca sativa* Mill.) / Laércio Novato Ribeiro Filho, 2026.

57 f.

Orientador (a): Dr. Paulo Araquém Ramos Cairo.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Fitotecnia. Vitória da Conquista, 2026.

Inclui referências F. 43 - 57

1. Estresse abiótico. 2. Condutividade elétrica. 3. Nutrição mineral. 4. Silício. 5. Trocas gasosas. I. Cairo, Paulo Araquém Ramos. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. T.

CDD: 635

**Catálogo na fonte: Karolyne Alcântara Profeta – CRB 5/2134**

UESB – Campus Vitória da Conquista – BA



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**  
**Área de Concentração em Fitotecnia**  
**Campus de Vitória da Conquista, BA**

**DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: “Aplicação Foliar e Radicular de Silício como Estratégia Para a Mitigação do Estresse Salino em Plantas de Rúcula (*Eruca sativa* Mill.)”**

**AUTOR (A): Laércio Novato Ribeiro Filho**

**Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA, pela seguinte Banca Examinadora:**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** PAULO ARAQUEM RAMOS CAIRO  
Data: 02/03/2026 18:07:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Paulo Araquém Ramos Cairo, D.Sc. (UESB)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** TOSHIK IARLEY DA SILVA  
Data: 02/03/2026 16:12:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Toshik Iarley da Silva, D.Sc. (UFRB)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CLAUDIVAN FEITOSA DE LACERDA  
Data: 02/03/2026 13:43:30-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Claudivan Feitosa de Lacerda, D.Sc. (UFC)

Data de realização: 27 de fevereiro de 2026.

## AGRADECIMENTOS

Ao Único Deus, digno de toda honra, glória e louvor, que me sustentou e me permitiu chegar até aqui.

Aos meus pais pelo exemplo, sustento e orações que me proporcionaram durante a jornada. Sem vocês, tudo seria muito mais difícil. Amo vocês.

À minha namorada Letícia, que me apoiou e se dedicou para me compreender e ter paciência comigo em todos os momentos. Amo você.

Ao meu irmão Sávio, por todo exemplo e orientações. Amo você.

A todos os meus familiares que dedicaram apoio e motivação.

Ao meu orientador e amigo, professor Paulo Araquém Ramos Cairo, pela orientação, paciência, correções e amizade.

Ao professor e amigo Cristiano Tagliaferre, por todo apoio, companheirismo, orientações e amizade.

A toda a equipe do Laboratório de Fisiologia Vegetal, por todo empenho e dedicação à realização deste trabalho.

A toda a equipe do Laboratório de Irrigação e Drenagem, por todo apoio e por abrir as portas do laboratório para mim.

Ao corpo docente de pós-graduação, pelos conhecimentos disseminados por meio das aulas.

A todos que torceram e incentivaram.

*“Ele é antes de todas as coisas, e nEle tudo subsiste.”*  
**Colossenses 1:17**

## RESUMO

Ribeiro Filho, L.N. **Aplicação foliar e radicular de silício como estratégia para a mitigação do estresse salino em plantas de rúcula (*Eruca sativa* Mill.)**. Vitória da Conquista - BA, UESB, 2026. 57p. (Dissertação: Mestrado em Agronomia; Área de Concentração: Fitotecnia)\*.

A salinidade está entre as formas de estresse abiótico que mais afetam negativamente o crescimento e o desenvolvimento das culturas agrícolas em todo o mundo. A rúcula (*Eruca sativa* Mill.) é uma olerícola cultivada em diversos cenários de condições ambientais, porém, a água de irrigação salina pode provocar danos ao crescimento dessa cultura. Este estudo objetivou avaliar o potencial de diferentes métodos de aplicação de Si – via raízes ou folhas – como estratégia para atenuar os efeitos negativos da salinidade, assim como compreender os mecanismos pelos quais o Si influencia possíveis alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, proporcionando mitigação do estresse salino. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, adotando-se um delineamento inteiramente casualizado, disposto em esquema fatorial 3×5, correspondente a três métodos de aplicação — ausência de silício (controle – C), via folhas (pulverização foliar – F) e via raízes (disponibilizado no substrato – R) — e diferentes níveis de NaCl, nas concentrações de 0; 12,5; 25,0; 37,5; e 50,0 mM. Os resultados mostram que o estresse salino reduziu a condutância estomática, a assimilação de CO<sub>2</sub>, a eficiência no uso da água e a eficiência de carboxilação. Por outro lado, aumentou os teores de osmólitos, levando a uma redução no potencial hídrico foliar, sem alterar o teor relativo de água. Além disso, favoreceu a peroxidação lipídica, intensificando a formação de espécies reativas de oxigênio. Combinados, esses efeitos resultaram em menor área foliar e altura de plantas, comparando com a ausência de NaCl. O Si não se mostrou um agente mitigador do estresse salino, considerando-se a resposta fotossintética e o crescimento das plantas de rúcula. No entanto, o Si proporcionou melhorias em parâmetros fisiológicos e bioquímicos foliares, independentemente das condições de salinidade. Esses efeitos foram mais evidentes com a aplicação foliar do que a aplicação via substrato. O Si aumentou a atividade da enzima superóxido dismutase, melhorando o sistema antioxidante. Os efeitos benéficos do Si também proporcionaram maior taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>, eficiência de carboxilação e capacidade de osmorregulação, resultando em maior altura de plantas e massa seca da parte aérea. Em conclusão, o Si parece não exercer papel determinante na mitigação do estresse salino em rúcula, mas, quando aplicado via foliar, pode ser considerado como uma alternativa viável para melhorar o desempenho de parâmetros associados ao crescimento das plantas, independentemente das condições de salinidade.

**Palavras-chave:** Estresse abiótico, condutividade elétrica, nutrição mineral, silício, trocas gasosas, osmólitos, estresse oxidativo.

---

\***Orientador:** Prof. Dr. Paulo Araquém Ramos Cairo, UESB.

## ABSTRACT

Ribeiro Filho, L.N. **Foliar and root application of silicon as a strategy for mitigating salt stress in arugula (*Eruca sativa* Mill.)**. Vitória da Conquista - BA, UESB, 2026. 57p. (Dissertation: Master Science in Agronomy; Area of Concentration: Crop Science).\*

Salinity is among the forms of abiotic stress that most negatively affect the growth and development of agricultural crops worldwide. Arugula (*Eruca sativa* Mill.) is a vegetable crop cultivated under various environmental conditions; however, saline irrigation water can cause damage to its growth. This study aimed to evaluate the potential of different methods of Si application – via roots or leaves – as a strategy to mitigate the negative effects of salinity, as well as to understand the mechanisms by which Si influences possible morphological, physiological, and biochemical changes, providing mitigation of salt stress. The experiment was conducted in a greenhouse, using a completely randomized design arranged in a 3×5 factorial scheme, corresponding to three application methods — absence of silicon (control – C), foliar application (foliar spray – F), and root application (supplied in the substrate – R) — and different NaCl levels at concentrations of 0, 12.5, 25.0, 37.5, and 50.0 mM. The results show that salt stress reduced stomatal conductance, CO<sub>2</sub> assimilation, water use efficiency, and carboxylation efficiency. On the other hand, it increased osmolyte contents, leading to a reduction in leaf water potential without altering the relative water content. Furthermore, it favored lipid peroxidation, intensifying the formation of reactive oxygen species. Combined, these effects resulted in smaller leaf area and plant height compared to the absence of NaCl. Silicon did not prove to be a mitigating agent for salt stress, considering the photosynthetic response and growth of arugula plants. However, Si provided improvements in physiological and biochemical leaf parameters, regardless of salinity conditions. These effects were more evident with foliar application than with substrate application. Silicon increased the activity of the enzyme superoxide dismutase, improving the antioxidant system. The beneficial effects of Si also provided a higher CO<sub>2</sub> assimilation rate, carboxylation efficiency, and osmoregulation capacity, resulting in greater plant height and shoot dry mass. In conclusion, Si does not appear to play a decisive role in mitigating salt stress in arugula, but when applied via foliar spray, it can be considered a viable alternative to improve the performance of parameters associated with plant growth, regardless of salinity conditions.

**Keywords:** Abiotic stress, electrical conductivity, mineral nutrition, silicon, gas exchange, osmolytes, oxidative stress.

---

\***Advisor:** Prof. Dr. Paulo Araquém Ramos Cairo, UESB.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Temperaturas média (T <sub>méd</sub> ), máxima (T <sub>máx</sub> ) e mínima (T <sub>mín</sub> ), e umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação, durante o período experimental .....	20
<b>Figura 2.</b> Assimilação de CO <sub>2</sub> (A) [A], condutância estomática (g <sub>s</sub> ) [B], concentração interna de CO <sub>2</sub> (C <sub>i</sub> ) [C], eficiência do uso da água (EUA) [D] e eficiência de carboxilação (A/C <sub>i</sub> ) [E] em plantas de rúcula submetidas à irrigação com níveis crescentes de NaCl, independentemente da aplicação de Si. Em cada coluna, as barras indicam o erro padrão, e as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( <i>p</i> < 0,05) .....	27
<b>Figura 3.</b> Assimilação de CO <sub>2</sub> (A) [A], condutância estomática (g <sub>s</sub> ) [B], transpiração (E) [C] e eficiência de carboxilação (A/C <sub>i</sub> ) [D] em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de Si, independentemente da salinidade. Em cada coluna, as barras indicam o erro padrão, e as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( <i>p</i> < 0,05) .....	28
<b>Figura 4.</b> Potencial hídrico no pre-dawn (Ψ <sub>w4h</sub> ) [A] e ao meio-dia (Ψ <sub>w12h</sub> ) [B] em plantas de rúcula submetidas à irrigação com níveis crescentes de NaCl, independentemente da aplicação de Si. Em cada coluna, as barras indicam o erro padrão, e as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( <i>p</i> < 0,05) .	29
<b>Figura 5.</b> Teores de amido [A], açúcares redutores (AR) [B], aminoácidos (AA) [C] e prolina (PRO) [D] em plantas de rúcula submetidas à irrigação com níveis crescentes de NaCl e a diferentes métodos de aplicação de Si. Em cada coluna, as barras representam o erro padrão. Letras maiúsculas comparam níveis de NaCl em uma mesma aplicação de Si, e letras minúsculas comparam aplicações de Si em um mesmo nível de NaCl, de acordo com o teste de Tukey ( <i>p</i> < 0,05) .....	31
<b>Figura 6.</b> Teor de açúcares solúveis (AS) em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de Si, independentemente de níveis de NaCl. Em cada coluna, as barras indicam o erro padrão, e as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( <i>p</i> < 0,05) .....	32
<b>Figura 7.</b> Altura de plantas de rúcula submetidas a diferentes níveis de NaCl, independentemente da aplicação de Si [A] e a métodos de aplicação de Si, independentemente de níveis de NaCl [B]. Em cada coluna, as barras representam o erro padrão, enquanto as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( <i>p</i> < 0,05) .....	33
<b>Figura 8.</b> Área foliar total de plantas de rúcula, em função de níveis de NaCl, independentemente da aplicação de Si [A]; e massa seca da parte aérea (MSPA), em função de diferentes métodos de aplicação de Si, independentemente de níveis de NaCl [B]. Em cada coluna, as barras representam o erro padrão, enquanto as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( <i>p</i> < 0,05) .....	33
<b>Figura 9.</b> Teor de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) em plantas de rúcula submetidas à irrigação com níveis crescentes de NaCl e a diferentes métodos de aplicação de Si. Em cada coluna, as barras representam o erro padrão. Letras maiúsculas comparam níveis de NaCl em uma mesma aplicação de Si, e letras minúsculas comparam aplicações de Si em um mesmo nível de NaCl, de acordo com o teste de Tukey ( <i>p</i> < 0,05) .....	34

**Figura 10.** Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de Si, independentemente de níveis de NaCl. Em cada coluna, as barras indicam o erro padrão, e as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) ..... 35

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Resumo da análise de variância e coeficiente de variação (CV) para assimilação de CO <sub>2</sub> ( <i>A</i> ), condutância estomática ( <i>g<sub>s</sub></i> ), transpiração ( <i>E</i> ), concentração interna de CO <sub>2</sub> ( <i>C<sub>i</sub></i> ), eficiência do uso da água (EUA), eficiência intrínseca do uso da água (EiUA), eficiência de carboxilação ( <i>A/C<sub>i</sub></i> ), em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de silício (Si) e níveis de NaCl (salinidade) .....	26
<b>Tabela 2.</b> Resumo da análise de variância e coeficiente de variação (CV) para potencial hídrico no pre-dawn ( $\Psi_{w4h}$ ) e ao meio-dia ( $\Psi_{w12h}$ ), variação no potencial hídrico ( $\Delta\Psi_w$ ) entre esses horários, e teor relativo de água (TRA) em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de silício (Si) e níveis de NaCl (salinidade) .....	29
<b>Tabela 3.</b> Resumo da análise de variância e coeficiente de variação (CV) para os teores de clorofila total (CHL), carotenoides (CAR), amido, açúcares solúveis (AS), açúcares redutores (AR) e prolina (PRO), em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de silício (Si) e níveis de NaCl (salinidade) ....	30
<b>Tabela 4.</b> Resumo da análise de variância e coeficiente de variação (CV) para altura de plantas (H), área foliar total (AF) e massa seca da parte aérea (MSPA) em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de silício (Si) e níveis de NaCl (salinidade).....	32
<b>Tabela 5.</b> Resumo da análise de variância e coeficiente de variação (CV) para substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) e atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de silício (Si) e níveis de NaCl (salinidade).....	34

## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	assimilação de CO <sub>2</sub>
AA	aminoácidos
AF	área foliar total
AR	açúcares redutores
AS	açúcares solúveis
C	sem aplicação de Si
CE	condutividade elétrica
C <sub>i</sub>	concentração interna de CO <sub>2</sub>
CV	coeficiente de variação
DAS	dias após a semeadura
DAT	dias após o transplântio
DMSO	dimetilsulfóxido
DNS	ácido dinitrosalicílico
DPV	déficit de pressão de vapor
<i>E</i>	transpiração
<i>A/C<sub>i</sub></i>	eficiência de carboxilação
EiUA	eficiência intrínseca do uso da água
ERO	espécies reativas de oxigênio
EUA	eficiência do uso da água
F	aplicação via pulverização foliar
<i>g</i>	gravidade
<i>g<sub>s</sub></i>	condutância estomática
MF	massa fresca
MS	massa seca
MSPA	massa seca da parte aérea
MT	massa túrgida
PRO	prolina
R	aplicação via substrato radicular
SOD	superóxido dismutase
TBA	ácido tiobarbitúrico
TBARS	substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico
TCA	ácido tricloroacético
TRA	teor relativo de água
v/v	volume por volume
W	watts
$\Delta\Psi_w$	variação de potencial hídrico
$\Psi_{w12h}$	potencial hídrico ao meio-dia
$\Psi_{w4h}$	potencial hídrico ao amanhecer

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
2.1 Aspectos gerais da cultura da rúcula .....	15
2.2 Efeitos da salinidade nas plantas .....	16
2.3 Efeitos do silício nas plantas .....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	19
3.1 Descrição da área experimental .....	19
3.2 Descrição dos tratamentos e delineamento experimental .....	20
3.3 Implementação e condução do experimento .....	20
3.4 Características avaliadas .....	21
3.4.1 Trocas gasosas .....	21
3.4.2 Estado hídrico da planta .....	22
3.4.3 Pigmentos fotossintéticos .....	22
3.4.4 Amido, açúcares solúveis, açúcares redutores, aminoácidos e prolina .....	23
3.4.5 Atributos biométricos .....	24
3.4.6 Substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico e atividade da enzima superóxido dismutase .....	25
3.5 Análise estatística .....	25
4 RESULTADOS .....	25
4.1 Trocas gasosas .....	25
4.2 Estado hídrico .....	28
4.3 Componentes químicos .....	29
4.4 Atributos biométricos .....	32
4.5 Espécies reativas de oxigênio e atividade da superóxido dismutase .....	33
5 DISCUSSÃO .....	35
6 CONCLUSÃO .....	41
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43

## 1 INTRODUÇÃO

Para os próximos anos, previsões apontam alterações climáticas que podem impactar a produção agrícola. Em todo o planeta, aumento de temperatura média é esperado (Menegassi et al., 2024), além de redução nas taxas de precipitação (Costa et al., 2025b), o que agrava o déficit hídrico. Mudanças nos padrões de chuva podem aumentar os níveis de salinidade do solo, colocando-o em risco de degradação irreversível e de longo prazo (Eswar et al., 2021).

A salinidade limita o crescimento e o desenvolvimento das plantas e reduz a produtividade. Além da salinização natural dos solos, oriunda do material de origem, outros fatores que podem aumentar os níveis de salinidade são a distribuição irregular de chuvas e a qualidade de água utilizada para irrigação. À medida que sais como sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) acumulam ao redor das raízes, percebem-se consequências indesejáveis, expressas em redução de altura, da área foliar, da diminuição no teor de pigmentos fotossintéticos, da formação de espécies reativas de oxigênio, culminando em peroxidação lipídica (Mushtaq et al., 2020; Qin et al., 2020; Roşca et al., 2023).

A rúcula (*Eruca sativa* Mill.) pode ser cultivada em diversos cenários de condições ambientais, porém, para melhorar as condições de cultivo e favorecer o desenvolvimento das plantas, utiliza-se um ambiente protegido como prática de manejo, principalmente na região semiárida brasileira, devido às altas temperaturas e à intensidade de luz características dessa região (Nogueira et al., 2025). Assim como para qualquer outra planta, a rúcula não suporta altos níveis de estresse salino, sendo considerada moderadamente sensível à salinidade, pois é possível cultivá-la com condutividade elétrica da solução do solo em torno de  $2,1 \text{ dS m}^{-1}$ , sem acarretar perdas de rendimento (Torres et al., 2024).

Em cultivos onde a irrigação com água salina é a única opção, é necessário o emprego de estratégias que controlem os efeitos deletérios da salinidade. Uma delas é o uso de silício (Si), um mineral não-essencial considerado benéfico, cuja presença está relacionada a melhorias em características e em processos das plantas (Mandlik et al., 2020). O Si se apresenta no solo sob formas pouco solúveis e não disponíveis para as plantas, como sílica, sílica gel e silicatos, e sob a forma solúvel, como o ácido monossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) (Thakral, et al., 2024).

O ácido monossilícico, ao ser absorvido, deposita-se, em parte, na superfície da raiz e na endoderme, sendo incorporado à parede celular. A outra parte é translocada para os órgãos da parte aérea através da rota transpiratória até chegar às folhas, onde forma fitólitos, que são depositados na parede celular, no espaço apoplástico e abaixo da cutícula, como sílica amorfa, formando uma camada dupla de sílica. Estudos anteriores sobre os efeitos da aplicação de silício para mitigar estresses abióticos basearam-se no fornecimento via raízes, por meio de solução nutritiva (Hajiboland et al., 2017; Bulchelt et al., 2020) ou adicionado ao solo (Camargo et al., 2019; Kuhla et al., 2021; Iqbal et al., 2024), ou via folhas, por meio de pulverização foliar (Bukhari et al., 2021; Jam et al., 2023).

Embora os múltiplos efeitos do Si em plantas submetidas a estresses abióticos tenham sido bem documentados, alguns estudos sugerem que, dependendo da espécie vegetal, o tipo e a magnitude de seus benefícios podem ser influenciados por diferentes métodos de aplicação. Segundo Camargo et al. (2019), a aplicação de Si no solo reduziu os efeitos do déficit hídrico na cana-de-açúcar, posto que esse método de aplicação proporcionou alta absorção pelas plantas. Como resultado, os efeitos do estresse podem ter sido atenuados porque 99% do absorvido pelas plantas formam “fitólitos opala” (também chamados de “pedras vegetais” ou “opalas vegetais” ou “sílica opalina”) na parede celular da folha, espaço intercelular e tricomas, o que ajuda a reduzir a transpiração e as perdas de água pelas plantas.

Estudos que priorizam o fornecimento de silício via raízes foram conduzidos particularmente em plantas que acumulam grandes quantidades desse nutriente, devido à alta atividade de transportadores especializados nas membranas celulares. Por outro lado, outros estudos também corroboram o efeito do fornecimento de Si por meio da absorção foliar de modo benéfico para estimular o crescimento das plantas em condições de estresses abióticos (Bukhari et al., 2020; Hassan et al., 2022).

A pulverização foliar de Si é uma técnica comum em viveiros de mudas, onde a nutrição mineral já é realizada dessa forma. Embora os efeitos do Si em plantas submetidas a estresses abióticos sejam variáveis, dependendo da espécie vegetal, considera-se que os benefícios advindos do uso desse nutriente para mitigar o estresse salino podem ser condicionados ao seu método de aplicação – via raízes, por adição ao substrato, ou via folhas, por pulverização. Neste estudo, plantas de rúcula foram submetidas a diferentes níveis de salinidade, com os seguintes objetivos: (i) avaliar o potencial de diferentes métodos de aplicação de Si – via raízes ou folhas – como estratégia

para atenuar os efeitos negativos da salinidade no crescimento; e (ii) compreender os mecanismos pelos quais o Si influencia possíveis alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, proporcionando mitigação do estresse salino.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Aspectos gerais da cultura da rúcula**

A rúcula (*Eruca sativa* Mill.) é uma olerícola anual herbácea folhosa, pertencente à família Brassicaceae, nativa dos países mediterrâneos, de crescimento vegetativo rápido e de ciclo curto (Jardina et al., 2017). Suas folhas têm sabor ácido característico e são uma rica fonte de vitaminas, de ferro, de cálcio, de compostos desintoxicantes e antioxidantes, sendo muito consumida em saladas frescas e em diversas receitas (Aguiar et al., 2014). Em alguns lugares do mundo, o óleo de suas sementes é extraído para fins industriais, alimentícios e farmacêuticos (Ahmed et al., 2024).

O cultivo da rúcula é possível durante todo o ano, porém a sua produção é maior quando temperatura e umidade relativa do ar não são muito elevadas ou baixas (Aguiar et al., 2014). O crescimento da rúcula admite solos com diferentes texturas, mas é seletivo ao pH, cujo ótimo é próximo à neutralidade, sendo sensível a solos ácidos e tolerante a solos alcalinos (Stanojković-Sebić et al., 2024). A irrigação é o requisito de cultivo mais importante, seguida da fertilização.

O consumo e a produção dessa hortaliça têm crescido bastante nos últimos anos. De acordo com o IBGE (2025), os dados mais recentes da produção anual brasileira, em 2017, registraram cerca de 40,5 mil toneladas, sendo o Sul e o Sudeste as regiões mais produtoras (Silva et al., 2012). A produção de rúcula tem origem, predominantemente, na agricultura familiar, em propriedades pequenas e médias, onde se utilizam águas de fontes superficiais ou de poços rasos, que podem apresentar elevadas concentrações de sais.

Uma prática crescente nos últimos anos é o cultivo de hortaliças em casas de vegetação, seja com o objetivo de dispor de dados para estudos (Araújo et al., 2009; Oliveira et al., 2013; Pramanik et al., 2020; Lima et al., 2021), seja para melhorar a produção de rúcula (Nomura et al., 2024; Santana et al., 2025). Em ambientes protegidos, há maior controle das condições de cultivo, tais como intensidade luminosa, temperatura e aeração, dentre outros fatores ambientais (Jardina et al., 2017). Contudo, mesmo em ambiente protegido, o uso inadequado da água de irrigação pode causar salinização do

substrato, acarretando danos às hortaliças, tanto em termos de crescimento e desenvolvimento como na produção final (Braga e Marouelli, 2017).

## 2.2 Efeitos da salinidade nas plantas

A salinidade é uma das formas mais comuns de estresse ambiental, cujos efeitos podem limitar o crescimento e o desenvolvimento das plantas e reduzir o rendimento de cultivos agrícolas (Hassan et al., 2021).

Para além da salinização natural do solo, a quantidade de sais solúveis, como sódio ( $\text{Na}^+$ ), cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), aumenta na zona radicular, como consequência de práticas de irrigação e de alterações climáticas (Van Zelm et al., 2020). Solos salinos ocorrem, frequentemente, em áreas irrigadas de regiões áridas e semiáridas, nas quais a distribuição de chuvas durante o ano é irregular e insuficiente para compensar as perdas de água por evapotranspiração e por lixiviar os sais adsorvidos aos colóides do solo (Alves et al., 2023).

As consequências indesejáveis da alta salinidade em plantas podem se manifestar na sua morfologia, na sua fisiologia e nos processos bioquímicos (Punia et al., 2021). Os efeitos sobre a morfologia podem aparecer em todas as fases do desenvolvimento, afetando altura de planta, relação raiz / parte aérea, área foliar, número de ramos e o número de folhas e flores (Roşca et al., 2023). O excesso de sais reduz o potencial hídrico do solo, o que dificulta a absorção de água e de nutrientes pelas raízes, diminuindo acentuadamente a área de absorção radicular, a densidade e o comprimento dos pelos radiculares (Arif et al., 2021). Apesar de existir uma breve recuperação da planta após a imposição do estresse salino, o alongamento e a divisão celular ainda permanecem afetados, resultando em taxa reduzida de desenvolvimento de raízes e parte aérea das plantas (Balasubramaniam et al., 2023).

Em relação aos reflexos da salinidade sobre processos bioquímicos, é comum ocorrer um decréscimo da taxa de fotossíntese, resultante de uma convergência de efeitos negativos, como inibição da biossíntese de clorofila (Qin et al., 2020), alteração na atividade enzimática (Hinai et al., 2022) e redução no suprimento de  $\text{CO}_2$ , causada pelo fechamento estomático (Orzechowska et al., 2021). A salinidade também causar estresse oxidativo e danos às membranas celulares, devido à formação de espécies reativas de oxigênio (ERO) (Mushtaq et al., 2020), principalmente superóxido ( $\text{O}_2^-$ ), peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), hidroxila radical ( $\text{OH}^-$ ) e oxigênio singlete ( $^1\text{O}_2$ ) (Khorobrykh et al.,

2020). As ERO interagem com outros componentes das células, causando danos ao DNA, peroxidação lipídica, inibição enzimática, oxidação de proteínas e desequilíbrios nutricionais (Hasanuzzaman et al., 2021). Em experimento hidropônico com rúcula, admitiu-se como tolerável uma salinidade de até 2,57 dS m<sup>-1</sup> (28 mM NaCl) (Silva et al., 2013).

### **2.3 Efeitos do silício nas plantas e ação como mitigador de estresses abióticos**

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre. Nos solos, está presente predominantemente sob as formas de sílica (SiO<sub>2</sub>), de sílica gel (sílica rica em poros que acumulam água) e de ácidos silicatados (H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (Souri et al., 2021), que são praticamente insolúveis e pouco disponíveis para as plantas (Epstein, 1994; Sommer et al., 2006). Entretanto, uma pequena fração de Si no solo se apresenta sob a forma de ácido monossilícico (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) (Imtiaz et al., 2016; Keeping, 2017), o qual é solúvel e pode ser absorvido pelas raízes, por meio dos transportadores Lsi1 e Lsi2 (Epstein, 1994).

Após ser absorvido pela planta, uma fração do Si se deposita na superfície da raiz e na endoderme, incorporando-se à parede celular e mineralizando a lamela média das células abaixo da hipoderme, enquanto o restante é translocado para a parte aérea através do fluxo transpiratório (Gong et al., 2006). Quando chega nos tecidos foliares, o Si forma pequenas partículas sólidas, denominadas fitólitos, que se depositam na parede celular, no espaço apoplástico e abaixo da cutícula como sílica amorfa (Mandlik et al., 2020), formando uma dupla camada sílica (Thorne et al., 2020).

Apesar de não ser classificado como um nutriente essencial, o Si é considerado benéfico, pois está associado a uma série de atividades metabólicas que aumentam a tolerância das plantas a estresses abióticos, como o salino (Flam-Shepherd et al., 2018). O acúmulo de Si nas raízes altera a permeabilidade das membranas celulares para recuperação estrutural das células (Luyckx et al., 2017) e pode estimular a imobilização de sais no interior da parede celular, diminuindo o seu transporte para outras partes da planta (Lux et al., 2013). Pode também mediar o funcionamento da bomba de H<sup>+</sup>-ATPase localizada na membrana plasmática e facilitar a exclusão de Na<sup>+</sup> do interior das células, evitando que este mineral expresse o seu potencial tóxico (Souri et al., 2021). O acúmulo de Si nas folhas pode contribuir para minimizar a transpiração e aumentar a exclusão de sais, o que permite preservar as reservas de água nas plantas, atenuando, assim, as consequências adversas do excesso de sais (Malhotra e Kapoor, 2019).

O Si pode compor entre 0,1% a 10% do peso seco das plantas, e o seu nível de acumulação em tecidos vegetais é atribuído, em parte, aos mecanismos de absorção e de transporte, os quais diferem, consideravelmente, entre as espécies (Farooq; e Dietz, 2015), e à presença, à densidade e à localização de proteínas que atuam como transportadoras nesse processo (Yan et al., 2018). A depender da concentração de Si nos tecidos, as plantas podem ser classificadas como acumuladoras, intermediárias ou não acumuladoras (Ma et al., 2006). Os efeitos benéficos do Si são perceptíveis tanto em espécies que têm alta absorção como as que registram baixa acumulação (Mandlik et al., 2020). Até o momento, os canais transportadores de Si não foram descritos em plantas de rúcula.

A presença desse nutriente proporcionou maior tolerância à salinidade em plantas de arroz (Ijaz et al., 2023), de soja (Peña-Calzada et al., 2023), de milho (Rizwan et al., 2023), de tomate (Dou et al., 2023) e de morango (Zahedi et al., 2023). Em geral, os seus efeitos têm sido relacionados a melhorias na eficiência fotossintética (Rastogi et al., 2021), ao aumento do crescimento vegetativo (Costa et al., 2024), a redução do acúmulo de sódio e cloreto, do teor de nutrientes na parte aérea (Rahmani et al., 2023), a resistência à perda de água e ao aperfeiçoamento do estado hídrico das plantas (Gao et al., 2006). Além disso, o Si tem um papel importante na estimulação do sistema de defesa antioxidante (Ning et al., 2020), o que diminui o dano fotooxidativo, sustenta a integridade da membrana celular (Etesami et al., 2018) e limita a peroxidação lipídica (Kim et al., 2017).

Os mecanismos de ação do Si no metabolismo vegetal ainda estão sendo investigados, mas já se sabe que a presença deste mineral é benéfica para a maioria das culturas (Zhu et al., 2019). O fornecimento de Si através da solução nutritiva (via radicular) para plantas de tomate ativou respostas adaptativas que reduziram danos oxidativos causados por espécies reativas de oxigênio, de modo a preservar a integridade da membrana celular da raiz e, ainda, a aumentar a absorção e a distribuição de nutrientes (Ferrández-Gómez et al., 2024).

Ismail et al. (2022) relataram que plantas de ervilha submetidas à salinidade, e tratadas com Si, apresentaram médias maiores para parâmetros biométricos, como altura, comprimento de raiz, massas seca e fresca de parte aérea e raiz, número de folhas e área foliar, além de um maior rendimento de cultivo e da diminuição de íons  $\text{Na}^+$  nos tecidos foliares. Em estudo com pimentão, Abdelaal et al. (2020) observaram que a aplicação foliar de Si levou a um aumento nas concentrações de clorofilas *a* e *b* e de nutrientes,

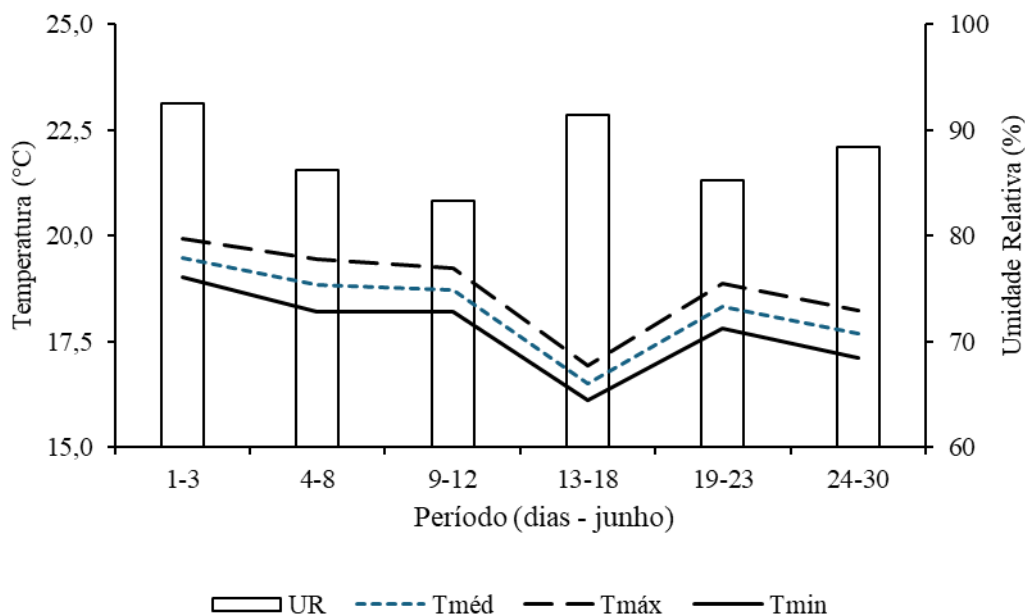
melhorias no estado hídrico e rendimento de frutos, e menor peroxidação lipídica, extravasamento de eletrólitos e níveis de espécies reativas de oxigênio. Segundo esses autores, a aplicação de Si contribuiu para aumentar a atividade de enzimas antioxidantes que promovem fotoproteção e inibem a degradação de clorofilas, o que, por sua vez, melhora a fotossíntese, o estado hídrico e o conteúdo relativo de água.

Em estudo com plantas de manjeriço, Farouk et al. (2020) relataram que a pulverização foliar de Si contribuiu para melhorar o sistema antioxidante, com resultados mais positivos em termos de mitigação do estresse salino, do que a sua adição via solo ou aplicação combinada (pulverização + via solo). Resultados positivos também foram encontrados nas culturas do milho e do pimentão, em termos de melhorias do sistema antioxidante, inclusive com aplicações via solo (Manivannan et al., 2016; Khan et al., 2018; Singh et al., 2022).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Descrição da área experimental**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na área experimental da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), *campus* de Vitória da Conquista (14°53'08" S, 40°48'02" W, altitude 881 m), entre maio e junho de 2025. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é tropical de altitude (Cwa), com estação seca no inverno, e verões quentes e úmidos. A estação chuvosa na região corresponde aos meses de novembro a março. O total pluviométrico anual é de cerca de 730 mm, e as médias térmicas mostram máximas de 26,4 °C e mínimas de 16,1 °C, com média anual de 20,2 °C. Durante o período experimental, a temperatura média e a umidade relativa média do ar foram 18,2 °C e 87,9%, respectivamente (Figura 1).



**Figura 1.** Temperaturas média (Tméd), máxima (Tmáx) e mínima (Tmín), e umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação, durante o período experimental

### 3.2 Descrição dos tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi organizado em delineamento inteiramente ao acaso (DIC), em esquema fatorial  $3 \times 5$ , com quatro repetições, sendo uma planta por parcela experimental. Um fator consistiu de três métodos de aplicação de Si — um grupo controle, sem aplicação de Si (C), e aplicações de Si via substrato radicular (R) e pulverização foliar (F). O outro fator consistiu das seguintes concentrações de NaCl adicionado à água de irrigação: 0,0; 12,5; 25,0; 37,5 e 50,0 mM.

### 3.3 Implementação e condução do experimento

Sementes de rúcula (*Eruca sativa*) cv “Astro” (Sakata®) foram colocadas para germinar em bandeja de polietileno de 128 células, três sementes por célula, contendo substrato agrícola Bioplant (turfa de sphagnum e fibra de coco). A germinação ocorreu dois dias após a semeadura (DAS), e o desbaste foi realizado aos 8 DAS, permanecendo uma plântula por célula. Aos 18 DAS, realizou-se o transplante das plântulas para vasos de polietileno de 3,7 dm<sup>3</sup>, contendo solo e vermiculita (1:1, v:v), e adubadas com solução nutritiva (Hoagland e Arnon, 1952). Para favorecer a aclimação das mudas ao novo substrato, a solução nutritiva foi fornecida inicialmente a uma força iônica de 25%,

seguida de elevação para 50% aos 8 dias após transplântio (DAT), até finalmente atingir 100% aos 17 DAT. Antes de ocorrer o transplântio, todas as plantas foram irrigadas a 90% da capacidade de vaso, determinando-se a umidade do substrato pelo método gravimétrico, de acordo com Souza et al. (2000), a qual foi monitorada a cada dois dias.

Para irrigação, utilizou-se uma solução estoque salina (NaCl 1,0 M), a qual foi diluída para níveis de salinidade de 0,0; 12,5; 25,0; 37,5 e 50,0 mM, correspondentes a níveis de condutividade elétrica (CE) de 0,4; 1,4; 2,5; 3,6 e 5,1 dS m<sup>-1</sup>, respectivamente. Como fonte de Si, foi usado o fertilizante comercial Sifol Powder (Diatom/Copasil®), uma fonte extremamente pura de nanosílica reativa (92% SiO<sub>2</sub>, 42,9% Si, tamanho de partícula 1-100 µm, pH 6,0 – 7,5), com alta dispersibilidade em água. Para os tratamentos usando apenas pulverização foliar, a superfície dos vasos foi coberta com um filme plástico para prevenir o espalhamento da solução no substrato. Para aplicação de Si apenas através das raízes, a dose total foi adicionada ao substrato. Para o tratamento controle, apenas água foi disponibilizada para a planta.

Para garantir que os diferentes tratamentos contendo Si, tanto pulverização quanto disponibilização via substrato, recebessem a mesma quantidade de solução silicatada, a dose de aplicação foi crescente, de acordo com o crescimento da planta, variando entre 1,0 a 5,0 mL por aplicação, com concentração padronizada de Si 2 mM, levando em consideração a concentração de Si no produto comercial. As aplicações ocorreram a cada 2 dias, alternando com os dias de irrigação, para não ocorrer alteração de concentração.

O experimento foi finalizado aos 35 DAT, quando as plantas foram removidas dos vasos, para fins de análises das variáveis biométricas, fisiológicas, bioquímicas e oxidativas.

### **3.4 Características avaliadas**

#### **3.4.1 Trocas gasosas foliares**

As taxas de assimilação de CO<sub>2</sub> ( $A$ ), a condutância estomática ( $g_s$ ), a transpiração ( $E$ ) e a concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ) foram medidas usando um Analisador de Gás Infravermelho (Infrared Gas Analyser – IRGA LCPro, ADC, UK). As folhas foram previamente submetidas à irradiância de 1200 µmol de fótons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. As medições de trocas gasosas foram realizadas em folhas fisiologicamente maduras e totalmente expandidas, entre 9h e 11h da manhã. Calculou-se a eficiência instantânea no uso da água

(EUA), com base em  $EUA = A/E$ ; a eficiência intrínseca do uso da água (EiUA), com base em  $EiUA = A/g_s$ ; e a eficiência de carboxilação ( $A/C_i$ ).

### 3.4.2 Estado hídrico da planta

O potencial hídrico da folha foi avaliado antes do amanhecer, às 4h ( $\Psi_{w4h}$ ), e ao meio-dia ( $\Psi_{w12h}$ ) em folhas fisiologicamente maduras, usando uma câmara de pressão (Modelo 1000, PMS) (Scholander et al., 1965). A variação do potencial hídrico durante a manhã ( $\Delta\Psi_w$ ) foi obtida com base na diferença entre essas medições. O teor relativo de água (TRA) foi medido com base no peso de discos foliares, de acordo com a seguinte fórmula:

$$TRA = [(MF - MS) / (MT - MS)] \times 100$$

Em que:

TRA = teor relativo de água (%)

MF = massa fresca

MS = massa seca

MT = massa túrgida

### 3.4.3 Pigmentos fotossintéticos

Os teores de pigmentos fotossintéticos foram obtidos por amostras de discos foliares submetidos à imersão em 4 mL de dimetilsulfóxido (DMSO) saturado com  $CaCO_3$  (Hiscox e Israelstam, 1979) por 12h, em ambiente escuro, para extração de clorofilas *a* e *b* e carotenoides. As concentrações foram determinadas usando um espectrofotômetro, tendo como referência os comprimentos de onda 665, 649 e 480 nm para as quantificações de clorofilas *a* e *b* e carotenoides (CAR), respectivamente (equações 1, 2 e 3). Clorofila total (CHL) foi obtida por soma de clorofilas *a* e *b*. Os resultados foram expressos em  $\mu g\ cm^{-2}$  (Wellburn, 1994).

$$\text{Clorofila } a = [(12,47 A_{665} - 3,62 A_{649}) \times V] / (1000 \times W) \quad (1)$$

$$\text{Clorofila } b = [(25,06 A_{649} - 6,5 A_{665}) \times V] / (1000 \times W) \quad (2)$$

$$\text{Carotenoides} = [(1000 A_{480} - 1,29 Cl_a - 53,78 Cl_b) / 220] / (1000 \times W) \quad (3)$$

Em que:

A = Absorbância no comprimento de onda indicado (nm)

$V = \text{Volume final do extrato clorofila} - \text{DMSO (mL)}$

$W = \text{Área do disco foliar (cm}^2\text{)}$

#### **3.4.4 Amido, açúcares solúveis, açúcares redutores, aminoácidos e prolina**

O material vegetal foi seco em estufa de circulação de ar forçado a 65 °C, por 72h. A quantificação do teor de amido foi feita com base em protocolo adaptado de Instrução Normativa nº 20 (Brasil 1999) e Soares et al. (2022). Amostras de 125 mg do material seco de folhas fisiologicamente maduras, previamente desengorduradas em hexano, foram adicionadas a 5 mL de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5 M) 72% e aquecidas a 100 °C, por 1 hora. Em seguida, adicionou-se água, completando o volume para 250 mL. Após resfriamento em gelo, retirou-se uma alíquota de 1 mL dessa solução, que foi misturada a 5 mL de solução de antrona 5 mM. A solução final foi aquecida a 100 °C, por 11 minutos, seguido de resfriamento à temperatura ambiente. A leitura foi feita em espectrofotômetro a 620 nm. Os resultados foram expressos em mg g<sup>-1</sup> de matéria seca.

Os teores de açúcares solúveis (AS) e redutores (AR) e aminoácidos (AA) foram quantificados em 200 mg do material seco de folhas consideradas fisiologicamente maduras, acrescentando 15 mL de solução tampão fosfato de potássio (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0,1 M) para atuar como extrator. O volume total do extrator foi dividido em três volumes iguais, para a realização de três centrifugações de 45 minutos, a 2.500 g. O sobrenadante foi recolhido.

Para a quantificação dos teores de AS, uma alíquota de 1 mL do sobrenadante foi adicionada a 2 mL de solução de antrona em um recipiente mantido sob resfriamento. O volume total da solução foi aquecido em banho-maria a 100 °C por três minutos e, posteriormente, resfriado à temperatura ambiente. As leituras foram feitas em espectrofotômetro a 620 nm, e os resultados foram expressos em mg de AS g<sup>-1</sup> de massa seca (Yemm e Willis, 1954).

Para determinar os teores de AR, uma alíquota de 0,8 mL do sobrenadante foi adicionada a um meio reacional contendo 0,5 mL de ácido dinitrosalicílico (DNS) e 0,4 mL de água deionizada, sob aquecimento em banho-maria, a 100 °C, por 5 minutos. Após o resfriamento à temperatura ambiente, foram adicionados 3,5 mL de água deionizada, elevando o volume para 5,0 mL. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro, a 540 nm, e os resultados foram expressos em mmol g<sup>-1</sup> massa seca (Miller, 1959).

Para a determinação dos teores de aminoácidos, alíquotas dos extratos foram adicionadas em meio reacional contendo 0,5 mL de citrato de sódio (0,2 M, pH 5), 0,2 mL de ninhidrina (5% em metilcelosolve), 1,0 mL de cianeto de potássio (KCN 0,01 M, 2% em metilcelosolve) e 0,4 mL de água deionizada, o qual foi colocado em banho-maria, a 100 °C, por 20 minutos. Após resfriamento à temperatura ambiente, foram adicionados 1,3 mL de etanol 60% (v/v), completando o volume para 4,0 mL. Em seguida, a leitura foi realizada em espectrofotômetro a 570 nm, e os resultados são expressos em  $\mu\text{mol}$  de aminoácidos  $\text{g}^{-1}$  massa seca (Yemm e Cocking, 1955).

Para a extração de prolina (PRO), 6 mL de ácido sulfossalicílico 3% (p/v) (extrator) foram adicionados a 200 mg do material seco e triturado. Após centrifugação (2500 g) por 10 minutos, uma alíquota de 2 mL do extrato foi coletada e adicionada a 2 mL de solução ácida de ninhidrina (1,25 g de ninhidrina, 30 mL de ácido acético glacial e 20 mL de ácido fosfórico 6 M) e 2 mL de ácido acético glacial, em tubos de ensaio de 15 mL. As amostras foram aquecidas em banho-maria a 100 °C por 1 hora e, depois, resfriadas com gelo, para paralisar a reação. Em seguida, foram adicionados 4 mL de tolueno, com agitação por 20 segundos, para a completa extração da prolina. O sobrenadante foi utilizado para a leitura em espectrofotômetro a 520 nm, e os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol}$   $\text{g}^{-1}$  massa seca (Bates et al., 1973).

### 3.4.5 Atributos biométricos

A altura da planta foi medida do colo ao ápice da folha de maior comprimento, usando régua graduada. A área foliar total, resultante da soma das áreas de todas as folhas, foi estimada com base no comprimento e na maior largura de cada folha, usando a seguinte fórmula (Oliveira et al., 2015):

$$AF = (0,3019 \times C \times L) + 4,6852 \quad (1)$$

Em que:

AF = área foliar ( $\text{cm}^2$ )

C = comprimento da folha (cm)

L = maior largura da folha (cm)

A massa seca parte aérea (MSPA) foi obtida após a secagem do material vegetal em uma estufa de circulação de ar forçada a  $70 \pm 5$  °C, por 72 horas.

### **3.4.6 Substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico e atividade da enzima superóxido dismutase**

O nível de peroxidação lipídica foi mensurado como a quantidade de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) determinada pela reação do ácido tiobarbitúrico (TBA), de acordo com Heath e Packer (1968). Folhas fisiologicamente maduras e liofilizadas (200 mg) foram homogeneizadas usando 2 mL de ácido tricloroacético (TCA) a 0,1% como extrator. O homogeneizado foi centrifugado por 5 minutos a 15.000 g a 4°C. Foi adicionado 1,5 mL de TBA 0,5% e TCA 20% a uma alíquota do sobrenadante, e a mistura foi submetida a aquecimento em banho-maria a 95 °C, por 30 minutos, seguido de resfriamento à temperatura ambiente. Após centrifugação a 10.000 g por 10 minutos, a absorbância foi medida a 532 nm usando um espectrofotômetro, e os resultados foram expressos como nmol g<sup>-1</sup> massa seca.

A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi estimada estabelecendo uma unidade de atividade da SOD como a quantidade de enzima necessária para causar 50% de inibição da taxa de redução do nitro blue tetrazolium (NBT) no extrato enzimático dos tecidos foliares, seguindo Beauchamp e Fridovich (1971). Uma alíquota de 100 µL do extrato enzimático foi transferida para um meio de reação no escuro com tampão NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 50 mM (pH 7,8), EDTA 0,1 mM, L-metionina 13 mM e NBT 75 µM. A reação começou com a adição de 2 µM de riboflavina, e o meio de reação foi colocado em uma câmara sob lâmpadas fluorescentes de 15 W, por 15 minutos. A atividade da SOD foi quantificada usando um espectrofotômetro a 560 nm e expressa como unidade mg<sup>-1</sup> de proteína.

### **3.5 Análise estatística**

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), utilizando o programa estatístico RStudio 4.4.1 (R Core Team, 2024).

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Trocas gasosas foliares**

Os resultados mostram que não houve interação entre os fatores, em termos de influência sobre as variáveis relacionados às trocas gasosas. No entanto, houve influência isolada dos fatores sobre quase todos as variáveis, exceto a eficiência intrínseca do uso da água. O fator salinidade influenciou a maioria dos demais parâmetros, exceto a transpiração e a eficiência intrínseca do uso da água. Os métodos de aplicação de Si, por sua vez, influenciaram a maioria das variáveis, exceto a concentração interna de CO<sub>2</sub> e a eficiência no uso da água (Tabela 1).

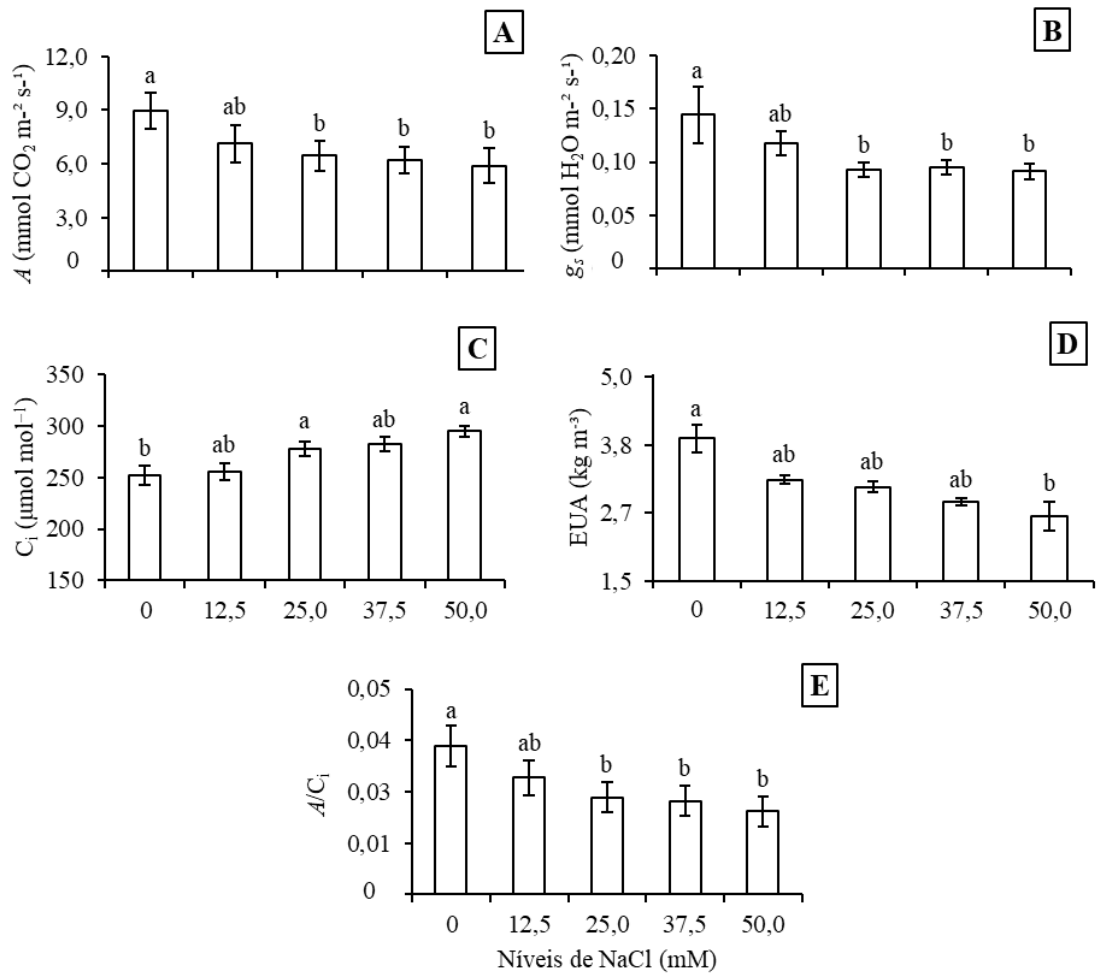
**Tabela 1.** Resumo da análise de variância e coeficiente de variação (CV) para assimilação de CO<sub>2</sub> (*A*), condutância estomática (*g<sub>s</sub>*), transpiração (*E*), concentração interna de CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>*), eficiência do uso da água (EUA), eficiência intrínseca do uso da água (EiUA), eficiência de carboxilação (*A/C<sub>i</sub>*), em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de silício (Si) e níveis de NaCl (salinidade).

Fontes de variação	GL	Quadrados médios						
		<i>A</i>	<i>g<sub>s</sub></i>	<i>E</i>	<i>C<sub>i</sub></i>	EUA	EiUA	<i>A/C<sub>i</sub></i>
Si	2	52,44*	0,011*	3,42*	1224,62 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	405,63 <sup>ns</sup>	0,0009*
Salinidade	4	18,16*	0,005*	0,29 <sup>ns</sup>	3665,17*	2,96*	178,77 <sup>ns</sup>	0,0005*
Si × Salinidade	8	0,31 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	360,94 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	280,50 <sup>ns</sup>	0,0000 <sup>ns</sup>
Resíduo	45	4,12	0,001	0,55	1273,51	0,90	819,22	0,0001
CV (%)		29,35	28,29	32,62	12,87	30,34	41,76	31,21

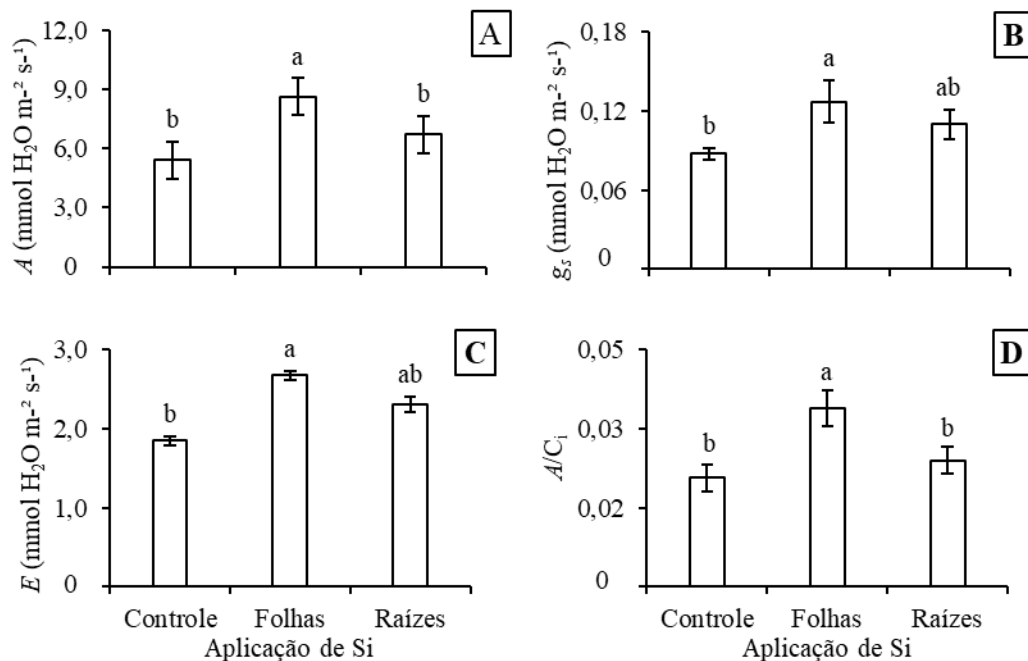
<sup>ns</sup>não significativo, \*significativo ( $p < 0,05$ ), de acordo com o teste F.

Em comparação com o tratamento controle, sem adição de NaCl, a salinidade reduziu a assimilação de CO<sub>2</sub> e a condutância estomática, refletindo negativamente em eficiência do uso da água e de carboxilação. Com o aumento da concentração de NaCl, observou-se uma tendência de estabilização desse efeito. Em contraste, houve aumento na concentração interna de CO<sub>2</sub>, que se tornou mais robusto com o aumento na concentração de NaCl (Figura 2).

Quanto ao fornecimento de Si, comparando com o tratamento controle, a aplicação via foliar proporcionou maior assimilação de CO<sub>2</sub>, condutância estomática, transpiração e eficiência de carboxilação. Já a aplicação via raízes sinalizou para uma tendência de aumento de condutância estomática e transpiração, mas isso não se refletiu em alterações na assimilação de CO<sub>2</sub> e na eficiência de carboxilação, dado que estes dois últimos não diferiram do controle (Figura 3).



**Figura 2.** Assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ) [A], condutância estomática ( $g_s$ ) [B], concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) [C], eficiência do uso da água (EUA) [D] e eficiência de carboxilação ( $A/C_i$ ) [E] em plantas de rúcula submetidas à irrigação com níveis crescentes de NaCl, independentemente da aplicação de Si. Em cada coluna, as barras indicam o erro padrão, e as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).



**Figura 3.** Assimilação de CO<sub>2</sub> (A) [A], condutância estomática (g<sub>s</sub>) [B], transpiração (E) [C] e eficiência de carboxilação (A/C<sub>i</sub>) [D] em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de Si, independentemente da salinidade. Em cada coluna, as barras indicam o erro padrão, e as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey (p < 0,05).

## 4.2 Estado hídrico

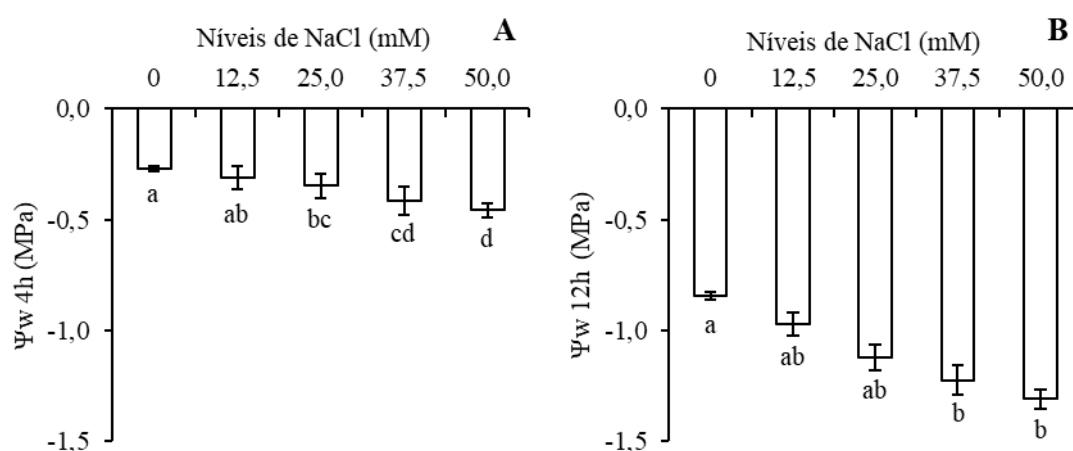
Não houve interação entre os fatores, em termos de influência sobre as variáveis relacionados ao estado hídrico. Isoladamente, a aplicação de Si também não afetou esses parâmetros. Todavia, a salinidade causou alterações no potencial hídrico, tanto no pre-dawn como ao meio-dia, mas sem afetar a variação entre esses horários ( $\Delta\Psi_w$ ). O teor relativo de água não foi afetado pela salinidade (Tabela 2).

Em comparação com o tratamento controle, sem adição de NaCl, a salinidade reduziu progressivamente o potencial hídrico, tanto no pre-dawn como ao meio-dia. Como nos dois horários aferidos essa redução ocorreu em proporções iguais, não houve variação na magnitude da queda do potencial hídrico entre o pre-dawn e o meio-dia (Figura 4).

**Tabela 2.** Resumo da análise de variância e coeficiente de variação (CV) para potencial hídrico no pre-dawn ( $\Psi_{w4h}$ ) e ao meio-dia ( $\Psi_{w12h}$ ), variação no potencial hídrico ( $\Delta\Psi_w$ ) entre esses horários, e teor relativo de água (TRA) em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de silício (Si) e níveis de NaCl (salinidade).

Fontes de variação	GL	Quadrados médios			
		$\Psi_{w4h}$	$\Psi_{w12h}$	$\Delta\Psi_w$	TRA
Si	2	0,0096 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,099 <sup>ns</sup>	30,12 <sup>ns</sup>
Salinidade	4	0,069*	0,42*	0,16 <sup>ns</sup>	20,45 <sup>ns</sup>
Si × Salinidade	8	0,0023 <sup>ns</sup>	0,011 <sup>ns</sup>	0,017 <sup>ns</sup>	16,29 <sup>ns</sup>
Resíduo	45	0,0047	0,094	0,11	15,26
CV (%)		18,92	28,12	20,07	4,54

<sup>ns</sup>não significativo, \*significativo ( $p < 0,05$ ), de acordo com o teste F.



**Figura 4.** Potencial hídrico no pre-dawn ( $\Psi_{w4h}$ ) [A] e ao meio-dia ( $\Psi_{w12h}$ ) [B] em plantas de rúcula submetidas à irrigação com níveis crescentes de NaCl, independentemente da aplicação de Si. Em cada coluna, as barras indicam o erro padrão, e as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

### 4.3 Componentes químicos

Não houve interação entre os fatores sobre o teor de açúcares solúveis, apenas o efeito isolado dos métodos de aplicação de Si. Houve interação entre os fatores, em termos de influência sobre os teores de amido, açúcares redutores e prolina. Os teores de clorofila total e carotenoides não foram influenciados pelos fatores, seja por interação, seja isoladamente (Tabela 3).

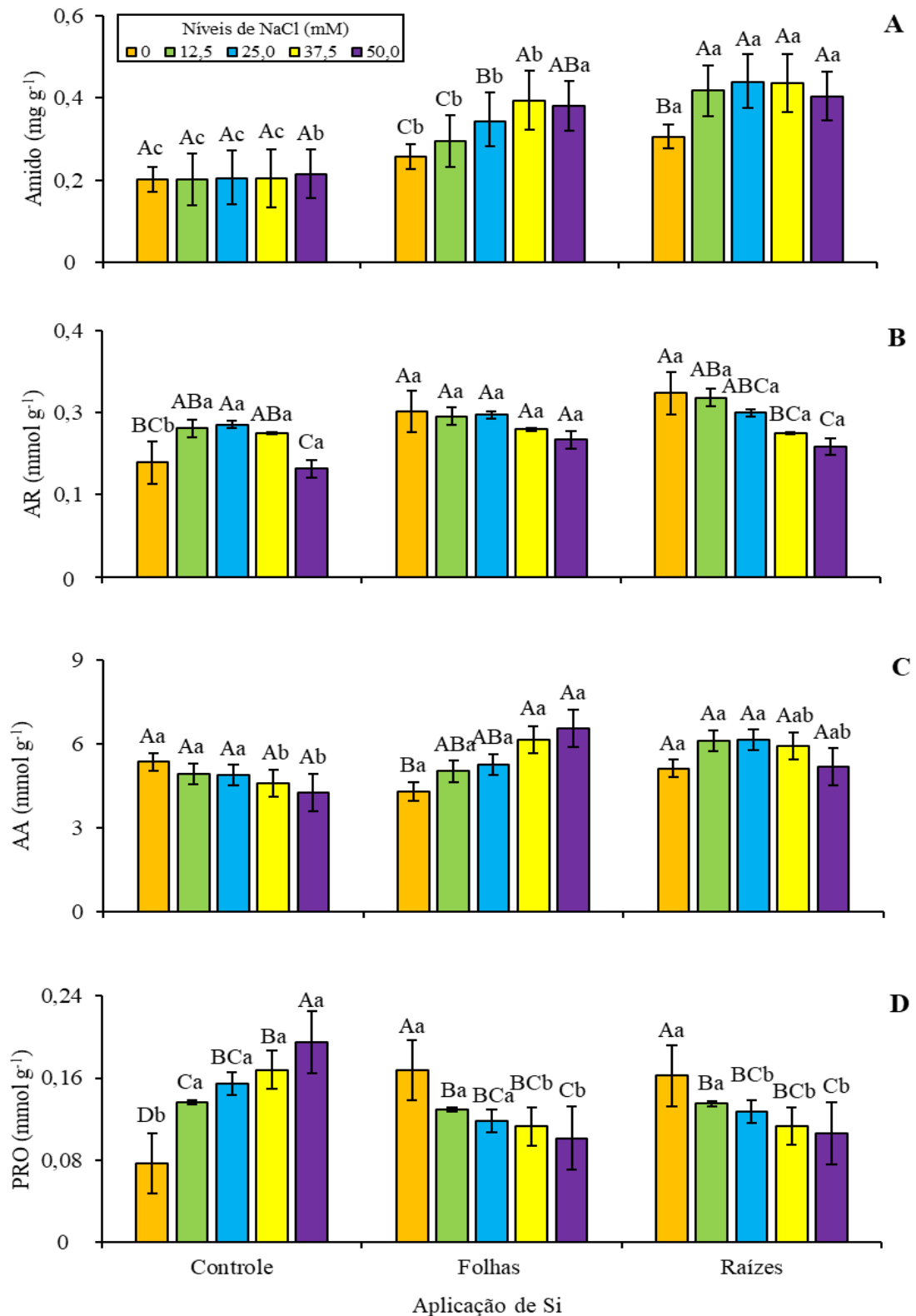
**Tabela 3.** Resumo da análise de variância e coeficiente de variação (CV) para os teores de clorofila total (CHL), carotenoides (CAR), amido, açúcares solúveis (AS), açúcares redutores (AR) e prolina (PRO), em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de silício (Si) e níveis de NaCl (salinidade).

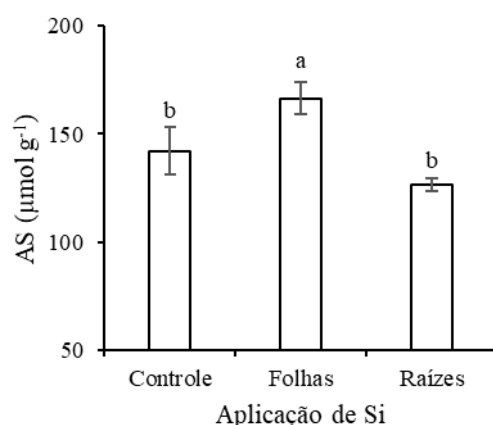
Fontes de variação	GL	Quadrados médios						
		CHL	CAR	Amido	AS	AR	AA	PRO
Si	2	0,00005 <sup>ns</sup>	0,00000003 <sup>ns</sup>	0,1971 <sup>**</sup>	8175,63 <sup>**</sup>	0,0096 <sup>**</sup>	4,294 <sup>**</sup>	0,0024 <sup>**</sup>
Salinidade	4	0,00070 <sup>ns</sup>	0,00000001 <sup>ns</sup>	0,0152 <sup>**</sup>	1668,4 <sup>ns</sup>	0,0073 <sup>**</sup>	0,688 <sup>ns</sup>	0,0003 <sup>ns</sup>
Si × Salinidade	8	0,00064 <sup>ns</sup>	0,00000003 <sup>ns</sup>	0,0051 <sup>**</sup>	982,74 <sup>ns</sup>	0,0018 <sup>*</sup>	2,109 <sup>**</sup>	0,0061 <sup>**</sup>
Resíduo	45	0,0004	0,00000003	0	885,24	0,0008	0,638	0,0001
CV (%)		16,59	10,48	6,32	20,52	11,76	15,05	9,03

<sup>ns</sup>não significativo, <sup>\*\*</sup>significativo ( $p < 0,01$ ), <sup>\*</sup>significativo ( $p < 0,05$ ), de acordo com o teste F.

Nas plantas não tratadas com Si, em termos de resposta ao aumento da salinidade, não houve alteração nos teores de amido e de aminoácidos. Por outro lado, nessas plantas, o teor de açúcares redutores aumentou em relação à testemunha, mas teve um decréscimo sob NaCl 50 mM, ao passo que o teor de prolina aumentou progressivamente, a cada elevação da concentração de NaCl (Figura 5).

A aplicação de Si aumentou o teor de amido, com o aumento da salinidade, independentemente do modo de aplicação. Para a aplicação de Si via foliar, esse aumento foi mais evidente sob NaCl 37,5 mM (Figura 5A). O Si aplicado via foliar aumentou o teor de açúcares solúveis, independente das concentrações de NaCl, mas esse aumento não foi observado para a aplicação de Si radicular, em relação ao controle (Figura 6). A aplicação foliar de Si preveniu a queda do teor de açúcares redutores mesmo sob salinidade elevada, porém esse efeito não foi observado com o fornecimento de Si através das raízes (Figura 5B). Com o aumento da salinidade, a aplicação foliar de Si levou a uma tendência de aumento no teor de aminoácidos, mas esse efeito não foi observado com o fornecimento de Si através das raízes (Figura 5C). A aplicação de Si, tanto pelas folhas como pelas raízes, levou a um decréscimo no teor de prolina, com o aumento da salinidade (Figura 5D). O teor de açúcares solúveis aumentou com a aplicação foliar de Si, independente da aplicação de NaCl, em comparação com o tratamento controle (Figura 5).





**Figura 6.** Teor de açúcares solúveis (AS) em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de Si, independentemente de níveis de NaCl. Em cada coluna, as barras indicam o erro padrão, e as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

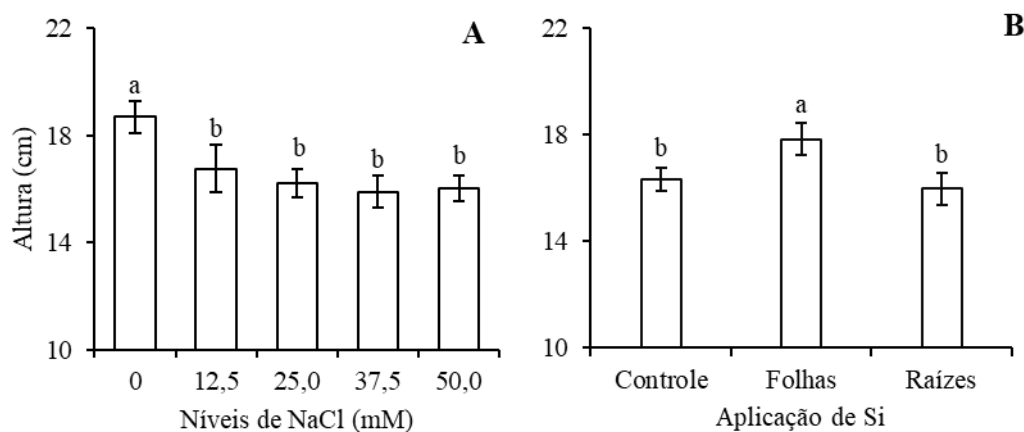
#### 4.4 Atributos biométricos

Não houve interação entre os fatores, em termos de influência sobre os atributos biométricos. No entanto, isoladamente, a salinidade influenciou a altura de plantas e a área foliar total, enquanto a aplicação de Si também influenciou a altura de plantas, além da massa seca da parte aérea (Tabela 4). A altura de plantas e a área foliar total foram afetadas negativamente pela salinidade. Por outro lado, a aplicação de Si pelas folhas elevou a altura de plantas e a massa seca da parte aérea, independentemente da salinidade (Figuras 7 e 8).

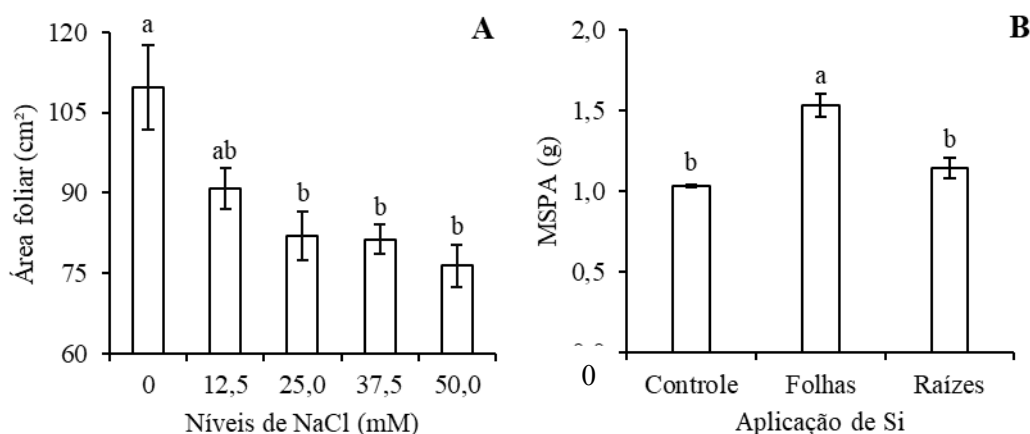
**Tabela 4.** Resumo da análise de variância e coeficiente de variação (CV) para altura de plantas (H), área foliar total (AF) e massa seca da parte aérea (MSPA) em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de silício (Si) e níveis de NaCl (salinidade).

Fontes de variação	GL	Quadrados médios		
		H	AF	MSPA
Si	2	25,11*	1043,93 <sup>ns</sup>	1,39*
Salinidade	4	19,53*	2066,97*	0,12 <sup>ns</sup>
Si × Salinidade	8	1,35 <sup>ns</sup>	102,03 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>
Resíduo	45	0,90	437,17	0,08
CV (%)		8,00	23,75	23,43

<sup>ns</sup>não significativo, \*significativo ( $p < 0,05$ ), de acordo com o teste F



**Figura 7.** Altura de plantas de rúcula submetidas a diferentes níveis de NaCl, independentemente da aplicação de Si [A] e a métodos de aplicação de Si, independentemente de níveis de NaCl [B]. Em cada coluna, as barras representam o erro padrão, enquanto as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).



**Figura 8.** Área foliar total de plantas de rúcula, em função de níveis de NaCl, independentemente da aplicação de Si [A]; e massa seca da parte aérea (MSPA), em função de diferentes métodos de aplicação de Si, independentemente de níveis de NaCl [B]. Em cada coluna, as barras representam o erro padrão, enquanto as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

#### 4.5 Espécies reativas de oxigênio e atividade da superóxido dismutase

Houve interação entre os fatores, apenas em termos de influência sobre a concentração de TBARS. Quanto à atividade da superóxido dismutase (SOD), observou-se influência isolada apenas dos métodos de aplicação de Si (Tabela 5).

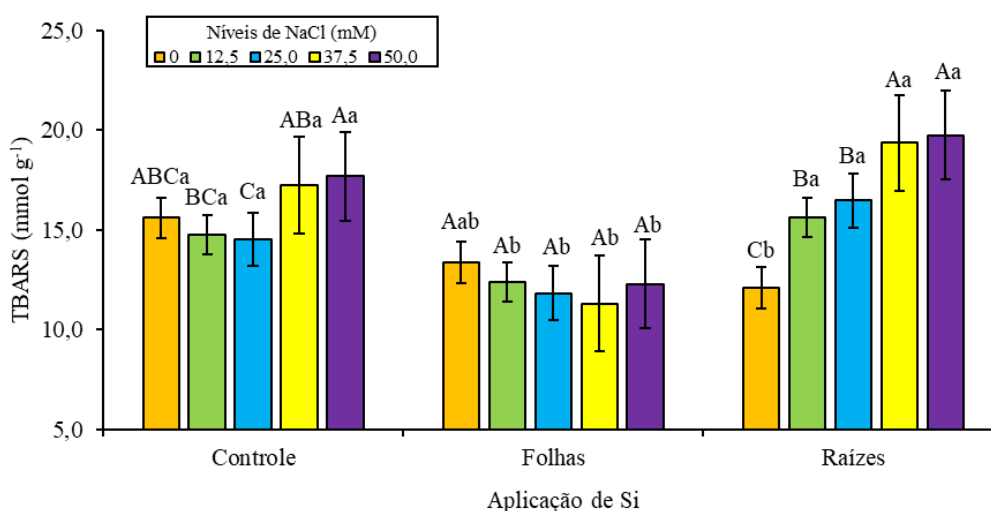
Nas plantas não tratadas com Si, com o aumento da salinidade, verificou-se uma tendência de elevação do teor de TBARS nas concentrações mais altas de NaCl. A aplicação de Si pelas raízes evidenciou essa tendência. Já a aplicação de Si pelas folhas, contribuiu para prevenir esse aumento, mantendo estável o teor de TBARS (Figura 9).

As aplicações de Si, tanto via folhas como via raízes, aumentou a atividade de SOD, em relação ao tratamento sem a adição de Si (Figura 10).

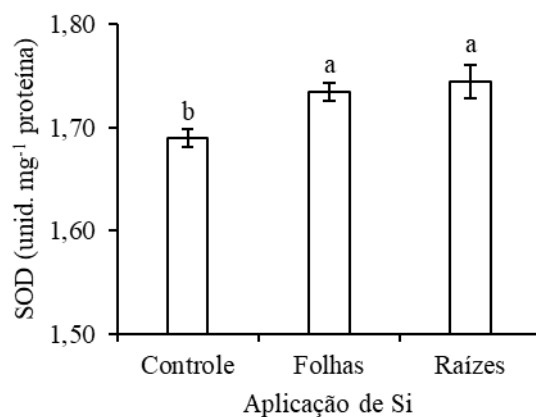
**Tabela 5.** Resumo da análise de variância e coeficiente de variação (CV) para substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) e atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de silício (Si) e níveis de NaCl (salinidade).

Fontes de variação	GL	Quadrados médios	
		TBARS	SOD
Si	2	111,35**	0,016**
Salinidade	4	17,68*	0,0014 <sup>ns</sup>
Si × Salinidade	8	15,25*	0,0037 <sup>ns</sup>
Resíduo	45	5,56	0,0022
CV (%)		15,80	2,71

<sup>ns</sup>não significativo, \*\*significativo ( $p < 0,01$ ), \*significativo ( $p < 0,05$ ), de acordo com o teste F.



**Figura 9.** Teor de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) em plantas de rúcula submetidas à irrigação com níveis crescentes de NaCl e a diferentes métodos de aplicação de Si. Em cada coluna, as barras representam o erro padrão. Letras maiúsculas comparam níveis de NaCl em uma mesma aplicação de Si, e letras minúsculas comparam aplicações de Si em um mesmo nível de NaCl, de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).



**Figura 10.** Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) em plantas de rúcula submetidas a diferentes métodos de aplicação de Si, independentemente de níveis de NaCl. Em cada coluna, as barras indicam o erro padrão, e as letras comparam médias, de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Quanto à superóxido dismutase, a aplicação de Si proporcionou maior atividade enzimática que nas plantas controle, independentemente do método de aplicação (Figura 10).

## 5 DISCUSSÃO

Os efeitos dos estresses abióticos, como a salinidade, são diversos e perturbam a biometria, a fisiologia, a bioquímica e o sistema antioxidante da grande maioria das espécies de plantas (Ivanova et al., 2015). Um dos efeitos do estresse salino é a redução do potencial hídrico do solo, devido ao acúmulo de sais na zona radicular, fazendo com que a água e os nutrientes da solução do solo sejam absorvidos com mais dificuldade (Sheldon et al., 2017). Em resposta, as plantas precisam evitar a perda do conteúdo hídrico presente em suas células e, por isso, reduzem a condutância estomática, diminuindo o tamanho dos poros pelos quais o vapor de água é disperso na atmosfera (Xue et al., 2021). Com isso, todo o processo fotossintético é alterado e pode ser, inclusive, inibido. A fotossíntese é a base fisiológica para a formação de biomassa da cultura, fornecendo energia para o crescimento e desenvolvimento da planta, e sua redução frequentemente leva diretamente à redução do crescimento vegetativo. Além disso, a superabundância de íons salinos potencialmente tóxicos  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  causa desequilíbrio iônico, resultando em redução da atividade fotossintética e da produção de biomassa em condições salinas severas (He et al., 2023; Wu et al., 2023). Em condições normais de crescimento, a água é absorvida pelas raízes e transpirada pelas folhas, e assim as plantas mantêm um

equilíbrio hídrico adequado, ajustando continuamente os processos de absorção e transpiração. Sob condições ambientais desfavoráveis, contudo, o controle estomático, tanto das perdas de água quanto da assimilação de CO<sub>2</sub>, torna-se um mecanismo vital para a aclimatação das plantas a estresses abióticos.

A influência da salinidade sobre a condutância estomática já foi relatada em estudo anterior, realizados com rúcula (Costa et al., 2025a). Nossos resultados corroboram esses estudos, já que, sob condições de salinidade, uma diminuição na condutância estomática refletiu em taxas mais reduzidas de assimilação de CO<sub>2</sub>. Além disso, observou-se um aumento na concentração interna de CO<sub>2</sub>, sugerindo baixa utilização desse gás na síntese primária de açúcares pelo processo fotossintético (Tominaga et al., 2018) e diminuição da eficiência de carboxilação. O aumento na concentração interna de CO<sub>2</sub> pode ser consequência de restrições metabólicas no ciclo de Calvin, ou seja, diminuição da atividade da enzima Rubisco em resposta ao aumento da salinidade que, de fato, pode ter sua atividade comprometida pelo acúmulo de Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup>, assim como de outras enzimas que atuam nas reações do ciclo de Calvin e nas membranas dos tilacoides (Pan et al., 2021; Taj e Challabathula, 2021). Plantas que diminuíram a condutância estomática também reduziram a assimilação de CO<sub>2</sub> (Sghaier-Hammami et al., 2021; Iqbal et al., 2023).

A eficiência do uso da água foi afetada negativamente com a salinidade, reduzindo à medida que a concentração de NaCl aumentou. As plantas precisam manter os estômatos abertos para que o CO<sub>2</sub> chegue ao sítio de carboxilação, mas não podem mantê-los totalmente abertos por muito tempo, pois implicaria maior perda de água por transpiração (Fernando et al., 2025). A redução da condutância estomática resultou em assimilação de CO<sub>2</sub> diminuída, mas sem interferir na transpiração, ou seja, a sensibilidade da cultura à salinidade refletiu em redução em fotossíntese e não em controle da transpiração. Sendo assim, ao que parece, esse é o motivo da diminuição da eficiência momentânea do uso da água, uma vez que é uma relação entre assimilação de CO<sub>2</sub> e transpiração (Gu et al., 2021). Em plantas de beterraba, a salinidade declinou a eficiência do uso da água, assim como condutância estomática e assimilação de CO<sub>2</sub> (Ribeiro et al., 2024). Na cultura da abóbora, houve redução na eficiência do uso da água com o aumento da salinidade da água de irrigação, mesmo sendo atendida a demanda hídrica da cultura (Sousa et al., 2022).

No presente estudo, independentemente da condição de salinidade, a aplicação de Si — nas folhas, apenas — contribuiu para aumentar a condutância estomática, refletindo

igualmente em aumento da transpiração e da assimilação de CO<sub>2</sub>. Nossos resultados corroboram aqueles obtidos em estudos anteriores, nos quais observou-se aumento na condutância estomática e melhoria na capacidade de absorção e assimilação de CO<sub>2</sub>, em resposta à aplicação de Si (Yan et al., 2013; Xie et al., 2014; Verma et al., 2015). Segundo Keutmann et al. (2015), o Si promove um espessamento da cutícula, que resulta da polimerização de H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> em fitólitos, uma sílica amorfa e hidratada (SiO<sub>2</sub>×nH<sub>2</sub>O). Os fitólitos se acumulam nas paredes celulares e espaços intercelulares, ou logo abaixo da cutícula, como sílica amorfa (Mandlik et al., 2020; Singh et al., 2020), formando uma dupla camada de sílica (Thorne et al., 2020), o que reduz a perda de água pela folha (Bukhari et al., 2021).

A quantidade de Si absorvido, assim como os seus potenciais benefícios, depende do nível de estresse da planta (Cooke e Carey, 2023). No presente estudo, referindo-se à aplicação de Si, o controle estomático sobre a transpiração não teve efeito positivo, em termos de melhoria da eficiência no uso da água, uma vez que a transpiração teve um aumento proporcional ao aumento de assimilação de CO<sub>2</sub>. Por outro lado, os resultados indicam que a aplicação foliar de Si contribuiu para melhorar a eficiência de carboxilação. De acordo com Vandegeer et al. (2021), a diminuição da condutância estomática pode ser atribuída, em parte, à sinalização do ácido abscísico, um hormônio sinalizador, responsável pela indução ao fechamento estomático. No entanto, a aplicação de Si está relacionada à diminuição dos níveis de ácido abscísico por suprimir a expressão de genes da biossíntese desse hormônio (Mushtaq et al., 2024). Dessa maneira, níveis mais baixos de ácido abscísico podem resultar em maior abertura estomática, maior transpiração e maior eficiência de carboxilação. Em concordância a isso, o aumento da assimilação de CO<sub>2</sub>, mantendo a concentração interna de CO<sub>2</sub>, induz maior eficiência carboxilativa (Avila et al., 2020). Ademais, a adição de Si protege as estruturas dos cloroplastos, incluindo enzimas-chave na fotossíntese, como ferredoxina-NADPH redutase, ATP-sintase e, principalmente, a Rubisco, bem como a estrutura e a função do aparato fotossintético. (Li et al., 2022b).

Em relação ao estado hídrico das plantas, a salinidade induziu alterações no potencial hídrico foliar, que se tornou sucessivamente menor, com o aumento de concentração de NaCl, tanto no pre-dawn como ao meio-dia. O estresse salino reduz o potencial hídrico foliar, porque o acúmulo de sais na zona radicular torna mais difícil a absorção de água do solo (Betzen et al., 2019). Por outro lado, a intensidade de variação do potencial hídrico foliar entre esses horários ( $\Delta\Psi_w$ ) não foi influenciada pelos

tratamentos, permanecendo inalterada mesmo com a ausência de salinidade. Concomitante à redução no potencial hídrico foliar, o teor relativo de água se manteve estável, mesmo com o aumento salinidade, o que sugere a ocorrência de ajuste osmótico (Turner et al., 2017). Os aumentos observados nos teores de alguns osmólitos compatíveis, tais como açúcares redutores e prolina, corroboram essa afirmação.

O acúmulo de solutos compatíveis é uma das respostas mais comuns em plantas cultivadas sob condições de salinidade, contribuindo para a osmorregulação e para a redução de danos ao metabolismo vegetal (Sharma et al., 2019). Neste estudo, houve interação entre os fatores em termos de influência sobre os teores de amido e de açúcares redutores. No tratamento sem aplicação de Si, verifica-se que a salinidade manteve os níveis de amido e aumentou os níveis de açúcares redutores, decrescendo apenas na concentração mais alta de NaCl. A aplicação de Si nas folhas aumentou o teor de amido com o aumento da salinidade e elevou o teor de açúcares redutores em relação à testemunha. Por outro lado, a aplicação radicular de Si aumentou o teor de amido com a salinidade e diminuiu o teor de açúcares redutores, com o aumento na concentração de NaCl. Apesar de a salinidade não ter influenciado o teor de açúcares solúveis, houve aumento em resposta à aplicação de Si. Grânulos de amido maiores foram relatados em plantas sob estresse salino (Goussi et al., 2018; Manaa et al., 2019). Estudos demonstraram que o amido é degradado sob alta salinidade ou estresse salino prolongado, devido à demanda de energia que as plantas necessitam para se manterem vivas (Alkhatib et al., 2021; Vineeth et al., 2023). A diminuição do teor de amido em resposta ao estresse é esperada ((Huang et al., 2019; Li, et al., 2022a), mas há evidências de que esse não é o único caminho (Thalmann e Santelia, 2017; Shen et al., 2019). Em plantas de pepino, por exemplo, o estresse salino aumentou as atividades de enzimas relacionadas à síntese de amido (AGP-pirofosforilase, SS-sintase, GBS-sintase) e diminuiu a atividade de  $\beta$ -amilase, enzima de degradação de amido (Shen et al., 2019). Esse contraste de aumento da atividade de enzimas sintetizadoras e diminuição da atividade de enzima digestiva de amido culmina em acúmulo, ou ao menos, manutenção do teor de amido.

Os açúcares são sintetizados pelo processo fotossintético nas folhas, os não redutores são transportados aos órgãos dreno ou armazenados, na forma de amido (Shen et al., 2024; Wang et al., 2025). Não apenas atendem às necessidades de crescimento das plantas, mas também são fonte energética para a adaptação ambiental frente a algum estresse. A salinidade pode induzir alterações sobre a partição de fotoassimilados, isso é, altera a proporção de formação de amido e/ou transporte de açúcares (Sellami et al.,

2019), pois estes, além de produtos primários da fotossíntese, são produtos da hidrólise do amido (Singh et al., 2022) e mantêm o turgor celular, protegem enzimas, proteínas e membranas dos efeitos deletérios de altas concentrações de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  (Siddiqui et al., 2021; Singh et al., 2022), atuando como osmoprotetores (Denver e Ullah 2019). Apesar de, neste estudo, o Si ter mantido os níveis de açúcares redutores, aumentou o teor de açúcares solúveis, independente dos níveis de NaCl. O Si tem sido relacionado com o aumento no conteúdo de carboidratos em folhas de plantas estressadas e não estressadas (Abdelaal et al., 2020) por aumentar a eficiência fotossintética das folhas, o que aumenta o teor de açúcares solúveis e redutores (Iqbal, 2024). Esse mesmo comportamento foi observado em soja (Hussain et al., 2021), tomate (Alam et al., 2022) e arroz (Alam et al., 2025).

Sem aplicação de Si, o aumento da concentração de NaCl não causou alterações no teor de aminoácidos, porém aumentou gradativamente o teor de prolina. As aplicações de Si foliar aumentaram o teor de aminoácidos com o aumento da salinidade e diminuiu o teor de prolina à medida que se aumentou as concentrações de NaCl. Já as aplicações de Si via radicular, mantiveram o teor de aminoácidos e reduziram o teor de prolina, em comparação ao tratamento controle. A prolina é um aminoácido que geralmente se acumula sob condições de estresse, e atua tanto na osmorregulação como na proteção ao aparato fotossintético, prevenindo a formação de ERO (Kishor et al., 2015; Meena et al., 2019). A salinidade aumentou o conteúdo de prolina em *Urochloa* spp (Silva et al., 2022) e trigo (Bagdi et al, 2022).

Sob aplicação foliar de Si, o aumento observado no teor de aminoácidos corrobora resultados anteriores obtidos com plantas de arroz (Ramirez-Olvera et al., 2021). Assim como os açúcares e outras substâncias, os aminoácidos alteram o potencial osmótico da célula, mantendo-a túrgida e evitando a perda de água por transpiração (Amin et al., 2018). A redução nos teores de prolina pode estar associada ao efeito benéfico do Si, que mantém o equilíbrio redox ao controlar a produção de espécies reativas de oxigênio, resultando em estabilidade na membrana plasmática celular (Singh et al., 2022). Zhu et al. (2020) relataram que o Si conferiu resistência ao estresse salino, resultando em menor produção de prolina. Em duas cultivares de arroz, o conteúdo de prolina também reduziu sob aplicação de Si, e aumentou sob déficit hídrico (Mauad, et al., 2016). Essa redução pode indicar o efeito indutivo do Si sobre outros antioxidantes para aliviar o estresse oxidativo, além de ter sido detectada diminuição no conteúdo de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  das folhas e tecidos radiculares após tratamentos com Si (Mahmoud et al., 2022). Nossos resultados

mostram que o Si proporcionou condições mais favoráveis para a fotossíntese, reduzindo os efeitos do estresse oxidativo, diminuindo a demanda por esse aminoácido. Efeito similar foi observado em plantas de soja, em que os níveis de prolina diminuíram juntamente com os níveis de ácido abscísico, hormônio conhecido por aumentar a sua concentração sob estresse (Rezetti et al., 2025).

No presente estudo, a salinidade reduziu a altura de plantas e a área foliar, por outro lado, as aplicações foliares de Si aumentaram a altura de plantas e massa seca da parte aérea, independentemente dos níveis de NaCl. A presença de sais solúveis em maior quantidade próximo à zona radicular altera o potencial hídrico do solo, o que ocasiona mudanças nas trocas gasosas e culmina em alterações biométricas nas plantas (Taiz et al., 2017; Costa et al., 2019). A altura da planta de rúcula está intrinsecamente relacionada com o comprimento da folha e da área foliar, e uma redução desses parâmetros é esperada, ocorrendo para diminuir a superfície evaporativa e a transpiração (Torres et al., 2024). Além disso, o efeito tóxico dos íons salinos pode alterar o metabolismo foliar e inibir, tanto a expansão quanto o surgimento de novas folhas (Corti et al., 2023). Plantas de pepino e de rúcula reduziram a área da folha, em resposta ao estresse salino (Yan et al., 2020; Dizkara, et al., 2025).

As aplicações foliares de Si resultaram em aumento de altura de planta e massa seca da parte aérea, independentemente das concentrações de NaCl. Atributos biométricos da soja também foram melhorados com a aplicação de Si (Sah et al., 2022). Da mesma maneira, em plantas de açafreão-bastardo (*Carthamus tinctorius*) foi observado acréscimo de altura de planta e massa seca da parte aérea após pulverização de Si (Jam et al., 2023). Um dos principais efeitos do Si é melhorar a fotossíntese, ao proteger a maquinaria fotossintética e suas funções (Al-Juthery et al., 2021; Rastogi et al., 2021). Com isso, reflexos na morfologia são percebidos, uma vez que há uma relação direta entre fotossíntese e produção de biomassa.

As concentrações mais altas de NaCl aumentaram o teor de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico, no tratamento controle. Os ensaios de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico quantificam o conteúdo de malondialdeído, produto da reação do ácido tiobarbitúrico com a parte fosfolipídica da membrana danificada, ou seja, é um produto da peroxidação lipídica (Zhang et al., 2024). Quando expostas a algum estresse abiótico, a membrana celular pode permitir o vazamento de eletrólitos por sofrer danos (Punia et al., 2021; Zhang et al., 2021), os quais são causados por espécies reativas de oxigênio, sugerindo que, quanto maior o teor de malondialdeído, maior é a peroxidação

lipídica. Em plantas de milho submetidas à salinidade, foi observado aumento no teor de malondialdeído à medida que a concentração de NaCl aumentou (Torğut e Akbulut, 2018), assim como em feijão (Taïbi et al., 2016). O Si pulverizado nas folhas e disponibilizado via raízes aumentou a atividade da enzima superóxido dismutase. As plantas geram antioxidantes, como a enzima superóxido dismutase para atuar contra as espécies reativas de oxigênio (Ma et al., 2016). Em plantas de trigo, houve aumento da atividade da superóxido dismutase, assim como de outras enzimas antioxidantes com aplicações de Si (Ning et al., 2023). Embora os mecanismos pelos quais o Si influencia a ativação de enzimas antioxidantes ainda não estejam claros, estudos sugerem que ele regula genes (por exemplo, TaSOD e TaCAT) que sintetizam e ativam essas enzimas (Ma et al., 2016; Mostofa et al., 2021). Dessa maneira, o aumento na atividade da enzima superóxido dismutase e a manutenção do teor de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico sugerem diminuição dos níveis de peroxidação lipídica.

## **6 CONCLUSÃO**

A salinidade compromete o desempenho fisiológico e o crescimento das plantas de rúcula, reduzindo a assimilação de CO<sub>2</sub>, a condutância estomática, a eficiência no uso da água e a eficiência de carboxilação. Por outro lado, aumenta o teor de osmólitos, reduzindo o potencial hídrico foliar, sem alterar o teor relativo de água. Além disso, favorece a peroxidação lipídica, intensificando a formação de espécies reativas de oxigênio. Combinados, esses efeitos resultam em menor área foliar e altura de plantas, comparando com a ausência de NaCl. O Si não se mostrou um agente mitigador do estresse salino, considerando-se a resposta fotossintética e o crescimento das plantas de rúcula. No entanto, o Si proporciona melhorias em parâmetros fisiológicos e bioquímicos foliares, independentemente das condições de salinidade. Esses efeitos são mais evidentes com a aplicação diretamente nas folhas do que aplicação no ambiente radicular. O Si aumenta a atividade da enzima superóxido dismutase, melhorando o sistema antioxidante. Os efeitos benéficos do Si também proporcionam maior assimilação de CO<sub>2</sub>, eficiência de carboxilação e de capacidade de osmorregulação, resultando em maior altura de plantas e massa seca da parte aérea. Em conclusão, o Si parece não exercer papel determinante na mitigação do estresse salino em rúcula, mas, quando aplicado via foliar, pode ser considerado como uma alternativa viável para melhorar o desempenho de

parâmetros associados ao crescimento das plantas, independentemente das condições de salinidade.

## 7 REFERÊNCIAS

- Abdelaal, K.A.A.; Mazrou, Y.S.A.; Hafez, Y.M. Silicon foliar application mitigates salt stress in sweet pepper plants by enhancing water status, photosynthesis, antioxidant enzyme activity and fruit yield. **Plants**. v.9, n.733, p.1-15. 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9060733>
- Aguiar, A.T.E.; Gonçalves, C.; Paterniani, M.A.G.Z.; Maria Luiza Sant'Anna Tucci, M.L.S.; Castro, C.E.F. **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas** (Boletim 200, IAC), 7ª ed. Campinas-SP, Instituto Agronômico de Campinas, 2014, 452p.
- Ahmed, N.; Azeem, M.; Abbasi, M.W.; Adnan, M.Y.; Yu, A.; Alamri, S.; Alfagham, A.T. *Eruca sativa* oil yields potential, fatty acids profiling, and physiological adaptations at the seed-filling stage with low-quality saline water irrigation. **Scientific Reports**, v.15, n.34674, p.1-18, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03096-3>
- Al-Juthery, H.W.A.; Lahmod, N.R.; Al-Tae, R.A.H.G. Intelligent, Nano-fertilizers: A new technology for improvement nutrient use efficiency (article review). **IOP Conference Series. Earth and Environmental Science**, v. 735, n. 1, p. 012086, 2021
- Alam, P.; Arshad, M.; Al-Kheraif, A.A.; Azzam, M. A.; Al-Balawi, T. Silicon nanoparticle induced regulation of carbohydrate metabolism, photosynthesis, and ROS homeostasis in *Solanum lycopersicum* subjected to salinity stress. **American Chemical Society**, v.7, n.36, 2022. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02586>
- Alam, P.; Faizan, M.; Sultan, H.; Al Balawi, T. Silicon oxide nanoparticles boost rice resilience to salinity by enhancing antioxidant defenses and stress regulation. **Plant Science**, v. 359, p.112588, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112588>
- Alkhatib, R.; Abdo, N.; Mheidat, M. Photosynthetic and ultrastructural properties of eggplant (*Solanum melongena*) under salinity stress. **Horticulturae**, v.7, n.181, p.1-12, 2021. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7070181>
- Alves, A. S.; Oliveira, F. A.; Silva, D. D.; Santos, S. T.; Oliveira, R. R. T.; Góis, H. M. M. N. Production and quality of mini watermelon under salt stress and K<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> ratios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.27, n.6, p.441-446, 2023. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n6p441-446>
- Alzahrani, O.; Abouseadaa, H.; Abdelmoneim, T.K.; Alshehri, M.A.; El-Mogy, M.M.; El-Beltagi, H.S.; Atia, M.A.M. Agronomical, physiological and molecular evaluation reveals superior salt-tolerance in bread wheat through salt-induced priming approach. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v.49, n.2, p.1-21, 2021. <https://doi.org/10.15835/nbha49212310>
- Amin, M.; Ahmad, R.; Ali, A.; Hussain, I.; Mahmood, R.; Aslam, M.; Lee, DJ. Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. **Silicon**, v.10, p.177-183, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9372-x>
- Araújo, J. S.; Andrade, A. P. de; Ramalho, C. I.; Azevedo, C. A. V. Cultivo do pimentão em condições protegidas sob diferentes doses de nitrogênio via fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 559-565, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500008>

- Arif, Y.; Singh, P.; Bajguz, A.; Alam, P.; Hayat, S. Silicon mediated abiotic stress tolerance in plants using physio-biochemical, omic approach and cross-talk with phytohormones. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.166, n.1, p.278–289, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.002>
- Avila, R.G.; Magalhães, P.C.; Silva, E.M; Júnior, C.G.; Lana, U.G.P.; Alvarenga, A.A.; Souza, T.C. Silicon supplementation improves tolerance to water deficiency in sorghum plants by increasing root system growth and improving photosynthesis. **Silicon**, v.12, p.2545–2554, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00349-5>
- Bagdi, D.L.; Gupta, S.; Bagdi, D.K.; Singhal, R.K.; Gupta, N.K. Photosynthesis, membrane stability and proline metabolism enzyme activity as potential indicators for salt tolerance in wheat. **Russian Journal of Plant Physiology**, v.69, n.104, p.1-8, 2022. <https://doi.org/10.1134/S1021443722050028>
- Balasubramaniam, T.; Shen, G.; Esmaceli, N.; Zhang, H. Plants response mechanisms to salinity stress. **Plants**, v.12, n.12, p. 2253, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12122253>
- Bates, L.S.; Waldren, R.P.; Teare, I.D. Rapid determination of free proline for water stress studies. **Plant and Soil**, v.39, p.205–207, 1973. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Beauchamp, C.; Fridovich, I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. **Analytical Biochemistry**, v.44, p.276–287, 1971. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
- Betzen, B.M.; Smart, C.M.; Maricle, K.L.; Maricle, B.R. Effects of increasing salinity on photosynthesis and plant water potential in Kansas salt marsh species. **Transactions of the Kansas Academy of Science**, v.122, n.1-2, p.49-58, 2019. <https://doi.org/10.1660/062.122.0105>
- Braga, M. B.; Marouelli, W. A. Produção integrada de pimentão – PIP: irrigação e fertirrigação na cultura do pimentão – Brasília, DF: **Embrapa Hortaliças** (Documentos, 152), 2017. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1084474/1/DOC152.pdf>
- Brasil – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa nº 20, de 21 de julho de 1999**. Oficializa os métodos analíticos físicoquímicos, para controle de produtos cárneos e seus ingredientes — sal e salmoura. Diário Oficial da União, Brasília, Brasil, 1999.
- Buchelt, A. C.; Teixeira, G. C. M.; Oliveira, K. S.; Rocha, A. M. S.; Mello Prado, R.; Caione, G. Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.20, n.3, p.1532–1548, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00245-7>
- Bukhari, M.A.; Ahmad, Z.; Ashraf, M.Y.; Afzal, M.; Nawaz, F.; Nafees, M.; Jatoi, W.N.; Malghani, N.A.; Shah, A.N.; Manan, A. Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. **Silicon**, v.13, p.4757–4772, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00797-4>

Camargo, M.S.; Bezerra, B.K.L.; Holland, L.A.; Oliveira, A.L.; Vitti, A.C.; Silva, M.A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.19, p.81–91, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

Cooke, J.; Carey, J.C. Stress alters the role of silicon in controlling plant water movement. **Functional Ecology**, v.37, p.2985–2999, 2023. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14447>

Corti, E.; Falsini, S.; Gonnelli, C.; Pieraccini, G.; Nako, B.; Papini, A. Salt affected rocket plants as a possible source of glucosinolates. **International Journal of Molecular Sciences**, v.24, n.6, p.1-14, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijms24065510>

Costa, B. N. S.; Salas, M. N. M.; Gil, K.; Khoddamzadeh, A. A. Effect of silicon amendment on growth and nitrogen Status of common landscaping plants. **American Journal of Plant Sciences**, v.15, n.8, p.603–616, 2024. <https://doi.org/10.4236/ajps.2024.158041>

Costa, J.M.F.; Silveira, C.S.; Costa, A.C.; Marcos Junior, A.D.; Gonçalves, S.T.N.; Trend analysis of precipitation extremes in Brazil: the role of atmospheric temperature. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v.60, p.e2123, 2025b. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94782123>

Costa, L.P.; Mendonça, V.; Oliveira, F.A.; Pinto, F.F.B.; Carlos, K.G. S.; Oliveira, M.K.T.; Medeiros, J.F.; Dias, V.L. Salt stress and calcium nitrate in arugula in soilless cultivation using substrate. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.29, n.2, p.e285670, 2025a. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n2e285670>

Costa, M.E.; Nascimento, E.K.Á.; Oliveira Miranda, N.; Pimenta, A.S.; Santos Rodrigues, A.P.M.; Mendonça Júnior, A.F. Efeito do biochar sobre condutividade elétrica e pH de solos irrigados com água salina. **Educamazônia – Educação, Sociedade e Meio Ambiente**, v.23, n.2, p.189–204, 2019. <https://doi.org/10.18378/rvads.v16i4.9251>

Denver, J.B.; Ullah, H. MiR393s regulate salt stress response pathway in *Arabidopsis thaliana* through scaffold protein RACK1A mediated ABA signalling pathways. **Plant Signaling and Behavior**, v.14, n.6, p.1600394, 2019. <https://doi.org/10.1080/15592.324.2019.16003.94>

Dizkara, H.; Yildirim, E.; Ekinçi, M. The effect of iodine on rocket (*Eruca sativa* L.) plant under salt stress. **Journal of Agricultural Production**, v.6, n.3, p.148–156, 2025. <https://doi.org/10.56430/japro.1746259>

Dou, Z.; Feng, H.; Zhang, H.; Abdelghany, A. E.; Zhang, F.; Li, Z.; Fan, J. Silicon application mitigated the adverse effects of salt stress and deficit irrigation on drip-irrigated greenhouse tomato. **Agricultural Water Management**, v.289, p.108526, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108526>

Epstein, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 91, p. 11–17, 1994. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>

- Etesami, H.; Jeong, B. R. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.147, p.881–896, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>
- Farooq, M. A.; Dietz, K. J. Silicon as versatile player in plant and human biology: overlooked and poorly understood. **Frontiers in Plant Science**, v.6, p.994, 2015. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00994>
- Farouk, S.; Elhindi, K. M.; Alotaibi, M. A. Silicon supplementation mitigates salinity stress on *Ocimum basilicum* L. via improving water balance, ion homeostasis, and antioxidant defense system. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.206, p.111396, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111396>
- Fernando, Y.; Adams, M.; Kuhlmann, M.; Junior, V.B. Stomatal and non-stomatal leaf traits for enhanced water use efficiency in rice. **Biology**, v.14, n.843, p.1-26, 2025. <https://doi.org/10.3390/biology14070843>
- Ferrández-Gómez, B.; Jordá, J. D.; Cerdán, M.; Sánchez-Sánchez, A. Enhancing salt stress tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) through silicon application in roots. **Plants**, v.13, n.10, p.1415, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13101415>
- Flam-Shepherd, R.; Huynh, W. Q.; Coskun, D.; Hamam, A. M.; Britto, D. T.; Kronzucker, H. J. Membrane fluxes, bypass flows, and sodium stress in rice: The influence of silicon. **Journal of Experimental Botany**, v.69, n.7, p.1679–1692, 2018. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx460>
- Gao, X.; Zou, C.; Wang, L.; Zhang, F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.29, n.9, p.1637–1647, 2006. <https://doi.org/10.1080/01904160600851494>
- Ghafoor, R.; Akram, N.A.; Rashid, M.; Ashraf, M.; Iqbal, M.; Lixin, Z. Exogenously applied proline induced changes in key anatomical features and physio-biochemical attributes in water stressed oat (*Avena sativa* L.) plants. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v.25, n.5, p.1121–1135, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00683-3>
- Gong, H. J.; Randall, D. P.; Flowers, T. J. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. **Plant, Cell and Environment**, v.29, n.10, p.1970–1979, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01572.x>
- Goussi, R.; Manaa, A.; Derbali, W.; Cantamessa, S.; Abdelly, C.; Barbato, R. Comparative analysis of salt stress, duration and intensity, on the chloroplast ultrastructure and photosynthetic apparatus in *Thellungiella salsuginea*. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, v.183, p.275–287, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.04.047>
- Gu, C.G.; Tang, Q.H.; Zhu, G.F.; Ma, J.; Gu, C.; Zhang, K.; Sun, S.; Yu, Q.; Niu, S. Discrepant responses between evapotranspiration and transpiration based ecosystem water use efficiency to interannual precipitation fluctuations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.303, p.108385, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2024.01.339>

Hajiboland, R.; Cheraghvareh, L.; Poschenrieder, C. Improvement of drought tolerance in tobacco (*Nicotiana rustica* L.) plants by silicon. **Journal of Plant Nutrition**, v.40, p.1661-1676, 2017. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1310887>

Hasanuzzaman, M.; Raihan, M.R.H.; Masud, A.A.C.; Rahman, K.; Nowroz, F.; Rahman, M.; Nahar, K.; Fujita, M. Regulation of reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under salinity. **International Journal of Molecular Science**, v.22, n.9326, p.1-30, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijms22179326>

Hassan, A.; Fasiha Amjad, S.; Hamzah Saleem, M.; Yasmin, H.; Imran, M.; Riaz, M.; Ali, Q.; Ahmad Joyia, F.; Mobeen; Ahmed, S.; Ali, S.; Abdullah Alsahli, A.; Nasser Alyemeni, M. foliar application of ascorbic acid enhances salinity stress tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) through modulation of morpho-physio-biochemical attributes, ions uptake, osmo-protectants and stress response genes expression. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v.28, n.8, p.4276–4290, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.03.045>

Hassan, I.F.; Ajaj, R.; Gaballah, M.S.; Ogbaga, C.C.; Kalaji, H.M.; Hatterman-Valenti, H.M.; Alam-Eldein, S.M. Foliar application of nano-silicon improves the physiological and biochemical characteristics of ‘kalamata’ olive subjected to deficit irrigation in a semi-arid climate. **Plants**, v.11, n.1561, p.1-21, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11121561>

He, A.; Ma, Z.; Li, Y.; Huang, C.; Yong, J.W.H.; Huang, J. Spatiotemporal, physiological and transcriptomic dynamics of wild jujube seedlings under saline conditions. **Tree Physiology**, v.43, p.832–850, 2023. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad001>

Heath, R. L.; Packer, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v.125, n.1, p.189-198, 1968. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)

Hinai, M.S.A.; Ullah, A.; Al-Rajhi, R.S.; Farooq, M. Proline accumulation, ion homeostasis and antioxidant defence system alleviate salt stress and protect carbon assimilation in bread wheat genotypes of Omani origin. **Environmental and Experimental Botany**, v.193, n.1, p.104687, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104687>

Hiscox, J. D.; Israelstam, G. F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. **Canadian Journal of Botany**, v.57, n.12, p.1332-1334, 1979.

Hoagland D.R.; Arnon, D.I. **The water-culture method for growing plants without soil**. Berkley, University of California / College of Agriculture. 1952

Hong, Y.; Boiti, A.; Vallone, D.; Foulkes, N.S. Reactive oxygen species signaling and oxidative stress: transcriptional regulation and evolution. **Antioxidants**, v.13, n.3, p.1-24, 2024. <https://doi.org/10.3390/antiox13030312>

Huang, L.; Li, Z.; Liu, Q.; Pu, G.; Zhang, Y.; Li, J. Research on the adaptive mechanism of photosynthetic apparatus under salt stress: new directions to increase crop yield in

saline soils. **Annals of Applied Biology**, v.175, p.1–17, 2019.  
<https://doi.org/10.1111/aab.12510>

Hussain, S.; Mumtaz, M.; Manzoor, S.; Shuxian, L.; Ahmed, I.; Skalicky, M.; Brestic, M.; Rastogi, A.; Ulhassan, Z.; Shafiq, I.; Allakhverdiev, A.; Khurshid, H.; Yang, W.; Liu, W. Foliar application of silicon improves growth of soybean by enhancing carbon metabolism under shading conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.159, p.43-52, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.053>.

Ijaz, U.; Ahmed, T.; Rizwan, M.; Noman, M.; Shah, A. A.; Azeem, F.; Alharby, H. F.; Bamagoos, A. A.; Alharbi, B. M.; Ali, S. Rice straw-based silicon nanoparticles improve morphological and nutrient profile of rice plants under salinity stress by triggering physiological and genetic repair mechanisms. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.201, p.107788. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107788>

Imtiaz, M., Rizwan, M. S., Mushtaq, M. A., Ashraf, M., Shahzad, S. M., Yousaf, B., Saeed, D. A.; Rizwan, Nawaz, M. A.; Mehmood, S.; Tu, S. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 183, p. 521–529, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.009>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – **IBGE**. Produção de rúcula. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/rucula/br> . Acesso em: 16 de janeiro de 2026.

Iqbal, S.; Balal, R.; Seleiman, M.; Mattia, M.; Chater, J.; Shahid, M. Silicon and potassium-induced modulations in leaf carbohydrate metabolism confer freezing tolerance in *Satsuma mandarin*. **Silicon**, v.16, p.5135-5146, 2024.  
<https://doi.org/10.1007/s12633-024-03070-0>

Iqbal, H.; Yaning, C.; Waqas, M.; Raza, S.T.; Shareef, M.; Ahmad, Z. (2023) Salinity and exogenous H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> improve gas exchange, osmoregulation, and antioxidant metabolism in quinoa under drought stress. **Physiologia Plantarum**, v.175, n.6, p.e14057, 2023. <https://doi.org/10.1111/pp1.14057>

Iqbal, S.; Hussain, M.; Sadiq, S.; Seleiman, M. F.; Sarkhosh, A.; Chater, J. M.; Shahid, M. A. Silicon nanoparticles confer hypoxia tolerance in citrus rootstocks by modulating antioxidant activities and carbohydrate metabolism. **Heliyon**, v.10, p.e22960, 2024.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22960>

Ismail, L. M.; Soliman, M. I.; Abd El-Aziz, M. H.; Abdel-Aziz, H. M. M. Impact of silica ions and nano silica on growth and productivity of pea plants under salinity stress. **Plants**, v.11, n.494, p.1-21, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11040494>

Ivanova K.; Dimitrova V.; Georgieva T.; Markovska Y. Effect of soil salinity on growth, gas exchange and antioxidant defence of two Paulownia lines. **Genetics and Plant Physiology**. v.4, n.1, p.163–173, 2015.

Jam, B.J.; Shekari, F.; Andalibi, B.; et al. Impact of silicon foliar application on the growth and physiological traits of *Carthamus tinctorius* L. exposed to salt stress. **Silicon**, v.15, p.1235–1245, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02090-y>

Jardina, L.L.; Cordeiro, C.A.M.; Silva, M.C.C.; Sanches, A.G.; Araújo Júnior, P.V. Desempenho produtivo e qualidade de cultivares de rúcula em sistema semihidropônico. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.4, n.1, p.78-82, 2017. <https://doi.org/10.32404/rean.v4i1.1399>

Keeping, M. G. Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00760>

Keutmann, I.; Melzer, B.; Seidel, R.; Thomann, R.; Speck, T. Review: The functions of phytoliths in land plants. In: Hamm, C. (Ed.). **Evolution of lightweight structures: analyses and technical applications**. Dordrecht, Springer, 2015. p. 157–169.

Khan, W. U. D.; Aziz, T.; Maqsood, M. A.; Farooq, M.; Abdullah, Y.; Ramzani, P. M. A.; Bilal, H. M. Silicon nutrition mitigates salinity stress in maize by modulating ion accumulation, photosynthesis, and antioxidants. **Photosynthetica**, v.56, n.4, p.1047–1057, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0812-x>

Khorobrykh, S.; Havurinne, V.; Mattila, H.; Tyystjärvi, E. Oxygen and ROS in photosynthesis. **Plants**, v.9, n.91, 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9010091>

Kuhla, J.; Pausch, J.; Schaller, J. Effect on soil water availability, rather than silicon uptake by plants, explains the beneficial effect of silicon on rice during drought. **Plant, Cell and Environment**, v.44, p.3336–3346, 2021. <https://doi.org/10.1111/pce.14155>

Kim, Y. H.; Khan, A. L.; Waqas, M.; Lee, I.-J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Frontiers in Plant Science**, v.8, n.510, p.1-7, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510>

Kishor, P.B.K.; Kumari, P.H.; Sunita, M.S.L.; Sreenivasulu, N. Role of proline in cell wall synthesis and plant development and its implications in plant ontogeny. **Frontiers in Plant Science**, v.6, n.544, p.1-17, 2015. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00544>

Li, C.; Li, Y.; Chu, P.; Hao-Hao, Z.; Wei, Z.; Cheng, Y.; Liu, X.; Zhao, F.; Li, Y.; Zhang, Z.; Zheng, Y.; Mu, Z. Effects of salt stress on sucrose metabolism and growth in Chinese rose (*Rosa chinensis*). **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, v.36, n.1, p.706–716, 2022a. <https://doi.org/10.1080/13102818.2022.2116356>

Li, L.; Qi, Q.; Zhang, H.; Dong, Q.; Iqbal, A.; Gui, H.; Kayoumu, M.; Song, M.; Zhang, X.; Wang, X. Ameliorative effects of silicon against salt stress in *Gossypium hirsutum* L. **Antioxidants**, v.11, n.1520, 2022b. <https://doi.org/10.3390/antiox11081520>

Lima, G.G.; Silva, S.A.S.; Viterbino, B.C.; Santos, V.N.; Araújo, M.L.M.; Cordeiro, C.B.; Araújo, E.V.B.; Silva, R.O. Analysis of the development of arugula cultivars submitted to different types of substrates. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.12, p.114775–114788, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n12-309>

Lux, A.; Luxová, M.; Abe, J.; Tanimoto, E.; Hattori, T.; Inanaga, S. The dynamics of silicon deposition in the sorghum root endodermis. **New Phytologist**, v.158, n.3, p.437-441, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00764.x>

- Luyckx, M.; Hausman, J. F.; Lutts, S.; Guerriero, G. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. **Frontiers in Plant Science**, v.8, n.408, p.1-8, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411>
- Ma, D.; Sun, D.; Wang, C.; Qin, H.; Ding, H.; Li, Y.; Guo, T. Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. **Journal of Plant Growth Regulation.**, v.35, p.1–10, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9500-2>
- Ma, J.F.; Yamaji, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v.11, p.392–397, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>
- Mahmoud, L.M.; Shalan, A.M.; El-Boray, M.S.S.; Vincent, C.; El-Kady, M.; Grosser, J.W.; Dutt, M. Application of silicon nanoparticles enhances oxidative stress tolerance in salt stressed ‘Valencia’ sweet orange plants. **Scientia Horticulturae**, v.295, p.110856, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110856>
- Malhotra, C.; Kapoor, R.T. Silicon: a sustainable tool in abiotic stress tolerance in plants. Plant abiotic stress tolerance: agronomic, molecular and biotechnological approaches. In: Hasanuzzaman, M.; Hakeem, K.; Nahar, K.; Alharby, H. (eds). **Plant abiotic stress tolerance**. Springer Nature Switzerland AG, 2019, p.333-356. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_14)
- Manaa, A.; Goussi, R.; Derbali, W.; Cantamessa, S.; Abdelly, C.; Barbato, R. Salinity tolerance of quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) as assessed by chloroplast ultrastructure and photosynthetic performance. **Environmental and Experimental Botany**. v.162, p.103–114, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.012>
- Mandlik, M.; Thakral, V.; Raturi, G.; Shinde, S.; Nikolić, M.; Tripathi, D.K.; Sonah, H.; Deshmukh, R. Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.71, n.21, p.6703–6718, 2020. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>
- Manivannan, A.; Soundararajan, P.; Muneer, S.; Ko, C.H.; Jeong, B.R. Silicon mitigates salinity stress by regulating the physiology, antioxidant enzyme activities, and protein expression in *Capsicum annuum* ‘Bugwang’. **BioMed Research International**, v.2016, p.1–14, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3076357>
- Mauad, M.; Crusciol, C. A. C.; Nascente, A. S.; Grassi Filho, H.; Lima, G. P. P. Effects of silicon and drought stress on biochemical characteristics of leaves of upland rice cultivars. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.3, p.532–539, 2016. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160064>
- Meena, M.; Divyanshu, K.; Kumar, S.; Swapnil, P.; Zehra, A.; Shukla, V.; Yadav, M.; Upadhyay, R.S. Regulation of L-proline biosynthesis, signal transduction, transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions. **Heliyon**, v.5, p.1-20, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02952>
- Menegassi, S. R. O; Lopes, L. F. D.; Morais, H.; Alencar, A. P.; Lopes, F. G.; Barça Junior, F. A. Climate change in Brazil: evolutionary, comparative and forecast study. **Theoretical and Applied Climatology**, v.155, p.2323–2328, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04778-6>

Milhomem, S.B.B.; Ramos, N.S.; Gonçalves, F.B.; Medeiros, G.H.; Fernandes, H.E.; Dotto, M.C.; Hakamada, R.E.; Siebeneichler, S.C.; Erasmo, E.A.L. Response of *Eucalyptus* seedlings to water stress in a warm tropical region in Brazil. **Forests**, v.16, n.12, p.1802, 2025. <https://doi.org/10.3390/f16121802>

Miller, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**, v.31, n.3, p.426-428, 1959. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>

Mostofa, M.G.; Rahman, M.M.; Ansary, M.M.U.; Keya, S.S.; Abdelrahman, M.; Miah, M.G.; Tran, L.-S.P. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. **Critical Reviews in Biotechnology**, v.41, n.6, p.918–934, 2021. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1892582>

Mushtaq, N.; Altaf, M.A.; Ning, J.; Shu, H.; Fu, H.; Lu, X.; Cheng, S.; Wang, Z. Silicon improves the drought tolerance in pepper plants through the induction of secondary metabolites, GA biosynthesis pathway, and suppression of chlorophyll degradation. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.214, p.108919, 2024.

Mushtaq, Z.; Faizan, S.; Gulzar, B. Salt stress, its impacts on plants and the strategies plants are employing against it: A review. **Journal of Applied Biology and Biotechnology**, v.8, n.3, p.81–91, 2020. <https://doi.org/10.7324/JABB.2020.80315>

Ning, D.; Zhang, Y.; Li, X.; Qin, A.; Huang, C.; Fu, Y.; Gao, Y.; Duan, A. The effects of foliar supplementation of silicon on physiological and biochemical responses of winter wheat to drought stress during different growth stages. **Plants**, v.12, n.12, p.1-14, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12122386>

Nogueira, D.R.S.; Benjamim, R.F.; Lins, H.A.; Souza, M.F.; Teófilo, T.M.S.; Silva, F.D.; Hernandez, M.C.R.; Silva, D. V. Effect of shading on the dynamics and weed interference in organic arugula crop. **Revista Caatinga**, v.38, p.e12666, 2025 <https://doi.org/10.1590/1983-21252025v3812666rc>

Nomura, M.; Pereira, D.H.; Oliveira, R.C.; Nascimento, E.M.S.; Lima, L.C.; Asmar, S.A.; Rocha, E.M.F.; Oliveira, M.C.; Trento, S.M. Behavior of two varieties of baby leaf arugula grown under different photoselective nets. **Caderno Pedagógico**, v.21, n.13, p.e11697, 2024. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-135>

Oliveira, F. A.; Duarte, S. N.; Medeiros, J. F.; Dias, N. S.; Silva, R. C. P.; Lima, C. J. G. S. Manejos da fertirrigação e doses de N<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> no cultivo de pimentão em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 11, p. 1152–1159, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001100004>

Oliveira, J.M. de; Andrean, A.F.B.A.; Lozano, C.S.; Maller, A.; Hachmann, T.L.; Rezende, R. Modelos para a estimativa da área foliar da cultura da rúcula (*Eruca sativa* Miller) com base em medidas lineares das folhas. In: **Encontro Internacional de Produção Científica UniCesumar (EPCC)**, v.9, 2015, Maringá. *Anais eletrônicos*. Maringá: UniCesumar, 2015. p.4–8.

Orzechowska, A.; Trtílek, M.; Tokarz, K.M.; Szymańska, R.; Niewiadomska, E.; Rozpądek, P.; Wątor, K. Thermal analysis of stomatal response under salinity and high light. **International Journal of Molecular Sciences**, v.22, n.9, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijms22094663>

- Pan, T.; Liu, M.; Kreslavski, V.D.; Zharmukhamedov, S.K.; Nie, C.; Yu, M.; Kuznetsov, V.V.; Allakhverdiev, S.I.; Shabala, S. Non-stomatal limitation of photosynthesis by soil salinity. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v.51, n.8, p.791–825, 2021. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1735231>
- Peña-Calzada, K.; Olivera-Viciedo, D.; Calero-Hurtado, A.; Mello Prado, R.; Habermann, E.; Lata Tenesaca, L. F.; Ajila, G.; Oliveira, R.; Rodríguez, J. C.; Lupino G.P. Silicon mitigates the negative impacts of salt stress in soybean plants. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.103, n.9, p.4360–4370, 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12503>
- Pramanik, K.; Mohapatra, P. P.; Pradhan, J.; Acharya, L. K.; Jena, C. Factors influencing performance of *Capsicum* under protected cultivation: a review. **International Journal of Environment and Climate Change**, v.10, n.12, p. 572–588, 2020. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2020/v10i1230339>
- Punia, H.; Tokas, J.; Malik, A.; Bajguz, A.; El-Sheikh, M.A.; Ahmad, P. Ascorbate–glutathione oxidant scavengers, metabolome analysis and adaptation mechanisms of ion exclusion in sorghum under salt stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v.22, n.24, p.1–31, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijms222413249>
- Punia, H.; Tokas, J.; Malik, A.; Singh, S.; Phogat, D.S.; Bhuker, A.; Mor, V.S.; Rani, A.; Sheokand, R.N. Discerning morpho-physiological and quality traits contributing to salinity tolerance acquisition in sorghum (*Sorghum bicolor* L.). **South African Journal of Botany**, v.140, n.1. p.409–418, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.09.036>
- Qin, C.; Ahanger, M.A.; Zhou, J.; Ahmed, N.; Wei, C.; Yuan, S.; Ashraf, M.; Zhang, L. Beneficial role of acetylcholine in chlorophyll metabolism and photosynthetic gas exchange in *Nicotiana benthamiana* seedlings under salinity stress. **Plant Biology**, v.22, n.3, p.357–365, 2020. <https://doi.org/10.1111/plb.13079>
- Rahmani, V.; Movahhedi, D.M.; Balouchi, H.; Yadavi, A.; Hamidian, M. Silicon can improve nutrient uptake and performance of black cumin under drought and salinity stresses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.54, n.3, p.297–310, 2023. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2112590>
- Ramírez-Olvera, S.M.; Trejo-Téllez, L.I.; Gómez-Merino, F.C.; Alcántar-González, E.G.; Saucedo-Veloz, C. Silicon stimulates plant growth and metabolism in rice plants under conventional and osmotic stress conditions. **Plants**, v.10, n.777, p.1–18, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10040777>
- Rastogi, A.; Yadav, S.; Hussain, S.; Kataria, S.; Hajjhashemi, P.; Kumari, P.; Yang, X.; Brestic, M. Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants? **Plant Physiology and Biochemistry**, v.169, p.40–48, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.004>
- Rejeb, K.B.; Abdelly, C.; Savouré, A. How reactive oxygen species and proline face stress together. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.80, p.278–284, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.04.007>

- Renzetti, M.; Funck, D.; Trovato, M. Proline and ROS: a unified mechanism in plant development and stress response? **Plants**, v.14, p.1-26, 2025. <https://doi.org/10.3390/plants14010002>
- Ribeiro, R.M.R.; Sousa, G.G.; Barbosa, A.S.; Matos, E.C.; Viana, T.V.A.; Leite, K.N.; Costa, F.H.R.; Cambissa, P.B.C.; Sales, J.R.S.; Santos, S.O. The impact of saline and water stress on the agronomic performance of beet crops. **Brazilian Journal of Biology**, v.84, p.1-7, 2024. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.276278>
- Rizwan, A.; Zia-Ur-Rehman, M.; Rizwan, M.; Usman, M.; Anayatullah, S.; Areej; Alharby, H. F.; Bamagoos, A. A.; Alharbi, B. M.; Ali, S. Effects of silicon nanoparticles and conventional Si amendments on growth and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) grown in saline-sodic soil. **Environmental Research**, v.227, p.115740, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115740>
- Roşca, M.; Mihalache, G.; Stoleru, V. Tomato responses to salinity stress: From morphological traits to genetic changes. **Frontiers in Plant Science**, v.14, n.1, p.1-26, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118383>
- Sah, S.K.; Reddy, K.R.; Li, J. Silicon enhances plant vegetative growth and soil water retention of soybean (*Glycine max*) plants under water-limiting conditions. **Plants**, v.11, n.1687, p.1-16, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11131687>
- Santana, T.D.; Dantas, T.; Souza, M.I.; Costa, E.; Binotti, F.F.S.; Vendruscolo, E.P.; Vieira, G.H.C.; Silva, G.P.V.; Melo, P.H.S.; Scalon, S.P.Q. Coloured cultivation benches increase the production and bioactive compounds in arugula. **South African Journal of Botany**, v.183, p. 136-146, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.05.036.bra>
- Schmidt, T.; Situ, A.J.; Ulmer, T.S. Structural and thermodynamic basis of proline-induced transmembrane complex stabilization. **Scientific Reports**, v.6, n. 29809, p.1-7, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep29809>
- Scholander, P. F.; Bradstreet, E. D.; Hemmingsen, E. A.; Hammel, H. T. Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. **Science**, v.148, n.3668, p.339-346, 1965. <https://doi.org/10.1126/science.148.3668.339>
- Sellami, S.; Le Hir, R.; Thorpe, M.R.; Vilaine, F.; Wolff, N.; Brini, F.; Dinant, S. Salinity effects on sugar homeostasis and vascular anatomy in the stem of the *Arabidopsis thaliana* inflorescence. **International Journal of Molecular Sciences**, v.20, p.1-19, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijms20133167>
- Sghaier-Hammami, B.; Hammami, S. B.; Baazaoui, N.; Chaari, S.; Drira, R.; Drira, N.; Smida, M.; Ben Jouira, H.; Goussi, R.; Zribi, F.; Rapoport, H. F.; Shatti, A.; Bettaieb, T.; Jorin Novo, J. V. Differential effect of water salinity levels on gas exchange, chlorophyll fluorescence and antioxidant compounds in ex vitro date palm plants. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v.51, n.2, p.13057, 2023. <https://doi.org/10.15835/nbha51213057>
- Sharma, A.; Shahzad, B.; Kumar, V.; Kohli, S.K.; Sidhu, G.P.S.; Bali, A.S.; Handa, N.; Kapoor, D.; Bhardwaj, R.; Zheng, B. Phytohormones regulate accumulation of

- osmolytes under abiotic stress. **Biomolecules**, v.9, n.285, p.1-36, 2019. <https://doi.org/10.3390/biom9070285>
- Sheldon, A. R.; Dalal, R. C.; Kirchoff, G.; Kopittke, P. M.; Menzies, N. W. The effect of salinity on plant-available water. **Plant and Soil**, v.418, n.1, p.477–491, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3309-7>
- Shen, J.; Wang, Y.; Shu, S.; Jahan, M.S.; Zhong, M.; Wu, J.; Sun, J.; Guo, S. Exogenous putrescine regulates leaf starch overaccumulation in cucumber under salt stress. **Scientia Horticulturae**, v.253, p.99-110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.010>.
- Shen, L.; Li, Z.; Huang, X.; Zhang, P.; Zhang, L.; Zhao, W.; Wen, Y.; Liu, H. Effects of polystyrene microplastic composite with florfenicol on photosynthetic carbon assimilation of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings: light reactions, carbon reactions, and molecular metabolism. **Journal of Hazardous Materials**, v.478, p.135470, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135470>
- Siddiqui, M.H., Khan, M.N., Mukherjee, S.; Alamri, S.; Basahi, R.A.; Al-Amri, A.A.; Alsubaie, Q.D.; Al-Munqedhi, B.M.A.; Ali, H.M.; Almohisen, I.A.A. Hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) and potassium (K<sup>+</sup>) synergistically induce drought stress tolerance through regulation of H<sup>+</sup>-ATPase activity, sugar metabolism, and antioxidative defense in tomato seedlings. **Plant Cell Reports**, v.40, p.1543–1564, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02731-3>
- Silva, A. O.; Klar, A.E.; Silva, Ê.F.F.; Tanaka, A.A.; Junior, J.F. Relações hídricas em cultivares de beterraba em diferentes níveis de salinidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1143–1151, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001100003>
- Silva, A. O.; Soares, T. M.; França e Silva, E. F.; Santos, A. N.; Klar, A. E. Consumo hídrico da rúcula em cultivo hidropônico NFT utilizando rejeitos de dessalinizador em Ibimirim - PE. **Irriga**, v. 17, n. 1, p. 114-125, 2012. <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v17n1p114>
- Silva, C.L.; Ferreira, R.C.A.B.; Alvarez-Pizarro, J.C. Na<sup>+</sup> exclusion and proline accumulation in *Urochloa* spp. cultivars. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.58, p.e03131, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03131>
- Singh, A.; Kumara, A.; Hartley, S.; Singh, I.K. Silicon: its ameliorative effect on plant defense against herbivory. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 21, p. 6730–6743, 2020. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa300>
- Singh, P.; Choudhary, K.K.; Chaudhary, N.; Gupta, S.; Sahu, M.; Tejaswini, B.; Sarkar, S. Salt stress resilience in plants mediated through osmolyte accumulation and its crosstalk mechanism with phytohormones. **Frontiers in Plant Science**, v.13, p.1-21, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1006617>
- Singh, P.; Kumar, V.; Sharma, J.; Saini, S.; Sharma, P.; Kumar, S.; Sinhmar, Y.; Kumar, D.; Sharma, A. Silicon supplementation alleviates the salinity stress in wheat plants by enhancing the plant water status, photosynthetic pigments, proline content and

antioxidant enzyme activities. **Plants**, v.11, n.19, p.1-19, 2022.  
<https://doi.org/10.3390/plants11192525>

Soares, P.P.S.; Cairo, P.A.R.; Silva, L.D.; Matsumoto, S.N.; Bonfim, R.A.A.; Barbosa, M.P.; Sá, M.C.; Almeida, M.F.; Mesquita, N.L.S. Mitigating water stress by increasing  $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$  ratio in young *Eucalyptus urophylla* plants. **Trees**, v. 36, p. 81–91, 2022.  
<https://doi.org/10.1007/s00468-021-02183-y>

Sommer, M.; Kaczorek, D.; Kuzyakov, Y.; Breuer, J. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes: a review. **Journal Nutrition Soils in Science**, v.169, p. 310–329, 2006.  
<https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>

Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N.; Ahmad, P. Silicon and plants: current knowledge and future prospects. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, p.906–925, 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>

Sousa, H.C.; Sousa, G.G.; Cambissa, P.B.C.; Lessa, C.I.N.; Goes, G.F.; Silva, F.D.B.; Abreu, F.S.; Viana, T.V.A. Gas exchange and growth of zucchini crop subjected to salt and water stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.26, n.11, p.815–822, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n11p815-822>

Souza, C. C.; Oliveira, F. A.; Silva, I. F.; Amorim Neto, M. S. Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p.338–342, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300006>

Stanojković-Sebić, A.; Miladinović, V.; Stajković-Srbinović, O.; Pivić, R. Response of arugula to integrated use of biological, inorganic, and organic fertilization. **Microorganisms**, v.12, n.7, p.1334, 2024.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms12071334>

Taïbi, K.; Taïbi, F.; Ait Abderrahim, L.; Ennajah, A.; Belkhodja, M.; Mulet, J.M. Effect of salt stress on growth, chlorophyll content, lipid peroxidation and antioxidant defence systems in *Phaseolus vulgaris* L. **South African Journal of Botany**, v.105, p.306–312, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.03.011>

Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I.M.; Murphy, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 858 p., 2017.

Taj, Z.; Challabathula, D. Protection of photosynthesis by halotolerant staphylococcus sciuri ET101 in tomato (*Lycopersicon esculentum*) and rice (*Oryza sativa*) plants during salinity stress: possible interplay between carboxylation and oxygenation in stress mitigation. **Frontiers in Microbiology**, v.11, n.547750, p. 1-24, 2021.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.547750>

Thakral, V.; Raturi, G.; Sudhakaran, S.; Mandlik, R.; Sharma, Y.; Shivaraj, S.M.; Tripathi, D.K.; Sonah, H.; Deshmukh, R. Silicon, a quasi-essential element: Availability in soil, fertilizer regime, optimum dosage, and uptake in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.208, p.108459, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108459>

Thalman, M.; Santelia, D. Starch as a determinant of plant fitness under abiotic stress. **New Phytologist**, v.214, p.943–951, 2017. <https://doi.org/10.1111/nph.14491>

- Thorne, S. J.; Hartley, S. E.; Maathuis, F. J. M. Is silicon a panacea for alleviating drought and salt stress in crops? **Frontiers in Plant Science**, v.11, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01221>
- Tominaga, J.; Shimada, H.; Kawamitsu, Y. Direct measurement of intercellular CO<sub>2</sub> concentration in a gas-exchange system resolves overestimation using the standard method. **Journal of Experimental Botany**, v.69, n.8, p.1981–1991, 2018. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery044>
- Torğut, G.; Akbulut, G.B. Effect of the novel biodegradable copolymer and soil salinity on the growth of corn plant. **Advances in Polymer Technology**, v.37, n.8, p.3588–3595, 2018. <https://doi.org/10.1002/adv.22143>
- Torres, M. B.; Gonçalves, F.R.F.; Lima, A.F.R.; Silva, A.O.; Sousa, G.G. Growth and physiological aspects of arugula subjected to soil salinity and fertilizer doses. **Revista Caatinga**, v.37, p.1-11, 2024. <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3712382rc>
- Turner, N.C. Turgor maintenance by osmotic adjustment, an adaptive mechanism for coping with plant water deficits. **Plant, Cell and Environment**, v.40, p.1–3, 2017. <https://doi.org/10.1111/pce.12839>
- Van Zelm, E.; Zhang, Y.; Testerink, C. Annual review of plant biology: salt tolerance mechanisms of plants. **Annual Reviews**, v.71, p.403-433, 2020. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718>
- Vandegeer, R.K.; Zhao, C.; Cibils-Stewart, X.; Wuhner, R.; Hall, C.R.; Hartley, S.E.; Tissue, D.T.; Johnson, S.N. Silicon deposition on guard cells increases stomatal sensitivity as mediated by K<sup>+</sup> efflux and consequently reduces stomatal conductance. **Physiologia Plantarum**, v.171, n.3, p.358–370, 2020. <https://doi.org/10.1111/ppl.13202>
- Verma, K.K.; Song, X.-P.; Zeng, Y.; Li, D.-M.; Guo, D.-J.; Rajput, V.D.; Chen, G.-L.; Barakhov, A.; Minkina, T.M.; Li, Y.-R. Characteristics of leaf stomata and their relationship with photosynthesis in *Saccharum officinarum* under drought and silicon application. **ACS Omega**, v.5, n.37, p.24145–24153, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03820>
- Vineeth, T. V.; Krishna, G. K.; Pandesha, P. H.; Sathee, L.; Thomas, S.; James, D.; Ravikiran, K.T.; Taria, S.; John, C.; Vinaykumar, K.T.; Lokeshkumar, B.M.; Jat, H.S.; Bose, J.; Camus, D.; Rathor, S.; Krishnamurthy, S.L.; Sharma, P.C. Photosynthetic machinery under salinity stress: Trepidations and adaptive mechanisms. **Photosynthetica**, v.61, p.73–93, 2023. <https://doi.org/10.32615/ps.2023.002>
- Wang, S.; Liu, P.; Chen, D.; Yin, L.; Li, H.; Deng, X. Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber. **Frontiers in Plant Science**, v.6, n.759, p.1-10, 2015. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00759>
- Wellburn, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v.144, n.3, p.307-313, 1994. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)

Wu, D.; Chen, C.; Liu, Y.; Yang, L.; Yong, J.W.H. Iso-osmotic calcium nitrate and sodium chloride stresses have differential effects on growth and photosynthetic capacity in tomato. **Scientia Horticulturae**, v.312, p.1-16, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111883>

Xie, Z.; Song, F.; Xu, H.; Shao, H.; Song, R. Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. **The Scientific World Journal**, v.2014, n. 718716, p.1-6, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/718716>.

Xue, F.; Liu, W.; Cao, H.; Song, L.; Ji, S.; Tong, L.; Ding, R. Stomatal conductance of tomato leaves is regulated by both ABA and leaf water potential under combined water and salt stress. **Physiologia Plantarum**, v.172, n.4, p.2070-2078, 2021. <https://doi.org/10.1111/PPL.13441>

Yan, G. C.; Nikolic, M.; Ye, M. J.; Xiao, Z. X.; Liang, Y. C. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture**, v.17, n.10, p.2138-2150, 2018. [http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62037-4](http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62037-4)

Yan, K.; Chen, P.; Shao, H.; Shao, C.; Zhao, S.; Brestic, M. Dissection of photosynthetic electron transport process in sweet sorghum under heat stress. **Plos One**, v.8, n.5, p.1-6, 2013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062100>

Yan, Y.; Sun, M.; Li, Y.; Wang, J.; He, C.; Yu, X. The CsGPA1–CsAQPs module is essential for salt tolerance of cucumber seedlings. **Plant Cell Reports**, v.39, n.10, p.1301–1316, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00299-020-02565-5>

Yemm, E.W.; Cocking, E.C. The determination of amino acid with ninhydrin. **Analyst**, v.80, p.209–213, 1955. <http://dx.doi.org/10.1039/an9558000209>

Zahedi, S. M.; Hosseini, M. S.; Fahadi Hoveizeh, N.; Kadkhodaei, S.; Vaculík, M. Comparative morphological, physiological and molecular analyses of drought-stressed strawberry plants affected by SiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub><sup>-</sup> NPs foliar spray. **Scientia Horticulturae**, v.309, p.111686, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111686>

Zhang, J.; Zhang, J.; Wang, J.; Zhang, A.; Deng, X. Estimation of malondialdehyde content in *Medicago truncatula* under salt stress based on multi-order spectral transformation characteristics. **Remote Sensing**, v.16, n.4049, p.1-20, 2024 <https://doi.org/10.3390/rs16214049>

Zhang, Y.; Luan, Q.; Jiang, J.; Li, Y. Prediction and utilization of malondialdehyde in exotic pine under drought stress using near-infrared spectroscopy. **Frontiers in Plant Science**, v.12, p.1-9, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.735275>

Zhu, Y.; Jiang, X.; Zhang, J.; He, Y.; Zhu, X.; Zhou, X.; Gong, H.; Yin, J.; Liu, Y. Silicon confers cucumber resistance to salinity stress through regulation of proline and cytokinins. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.156, p.209–220, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.014>

Zhu, Y.-X.; Gong, H.-J.; Yin, J.-L. Role of silicon in mediating salt tolerance in plants: a review. **Plants**, v.8, n.6, p.147, 2019. <https://doi.org/10.3390/plants8060147>